



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

“Evaluación de desempeño tecnológico de estaciones de recarga de vehículos eléctricos (EVs) y generación renovable asociada. EDER EVs”

Héctor Augusto Ortega Carrascal

Universidad Nacional de Colombia
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá D.C., Colombia

2019

Evaluación de desempeño tecnológico de estaciones de recarga de vehículos eléctricos (EVs) y generación renovable asociada. EDER EVs

Héctor Augusto Ortega Carrascal

Trabajo final de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Eléctrica

Director (a):

Javier Rosero García, Ph.D.,

Línea de Investigación:

Vehículos Eléctricos

Grupo de Investigación:

Electrical Machines and Drives, EM&D

Universidad Nacional de Colombia

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Bogotá D.C., Colombia

2019

“...The undiscovered country from whose bourn no traveler returns...”

3 Acto Hamlet, William Shakespeare

“Your imagination is your preview of life’s coming attractions.”

Albert Einstein

Agradecimientos

Le doy gracias a la Universidad Nacional de Colombia por las oportunidades y desafíos que me ha otorgado.

Agradezco a mi Esposa María Isabel Guatame Castro quién me apoyó y alentó a seguir con mis estudios, gracias Amor Mío por tu comprensión y fortaleza. A Mis Hijas Amelia y Lucia quienes me esperaron siempre.

Agradezco a mis Padres Héctor y Rosa Inés por su aliento de vida, y a mi Hermano Iván Rafael por su ejemplo.

Agradezco al Profesor Javier Rosero que como Director de este trabajo de grado preciso metas, compartió su experiencia investigativa y sus conocimientos.

Agradezco a GERS S.A. por su apoyo y consejos sobre la elaboración de las simulaciones en especial al Ingeniero Leinyker Palacios por su ayuda.

Agradezco a mis compañeros integrantes del Grupo en Máquinas Eléctricas y Drives de la Universidad Nacional de Colombia EM&D, quienes me ayudaron en múltiples ocasiones desinteresadamente y contribuyeron en el cumplimiento de las metas de este trabajo.

Resumen



Proponente:	Héctor Augusto Ortega Carrascal
e-mail:	haortegac@unal.edu.co
Programa:	Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica
Director:	Javier Rosero García, Ph.D.
	Evaluación de desempeño tecnológico de
Título de la Trabajo de	estaciones de recarga de vehículos eléctricos
Grado:	(EVs) y generación renovable asociada. EDER
	Evs
Entidad:	Universidad Nacional de Colombia
Dirección:	oficina 208, Bogotá D.C.
e-mail:	emd_bog@unal.edu.co
Teléfono:	+57 316 5000 Ext 10696:
Línea de Investigación:	Movilidad Eléctrica
Grupo de Investigación	Electrical Machines & Drives, EM&D -
	COL0120979
Url:	www.ing.unal.edu.co/grupos/emd/index.html

El modelo de movilidad eléctrica puede ser viable para transporte masivo y para transporte individual. Sin embargo, este modelo requiere infraestructura que garantice el suministro de energía eléctrica de la misma manera en que está para los Vehículos de Combustión Interna (ICE).

Este documento presenta la evaluación del desempeño tecnológico de las Estaciones de Recargas Rápidas. La evaluación tecnológica incluye los siguientes escenarios: cuando la estación de recarga es alimentada por la red eléctrica, y cuando es soportada por generación renovable con sistemas de almacenamiento.

La evaluación se realiza con el apoyo del NEPLAN que es una herramienta informática para analizar, planear, optimizar y simular redes eléctricas. Con el NEPLAN se simulan los diferentes escenarios en estado de falla y de funcionamiento normal.

Este documento revisa la reglamentación estableciendo sus alcances, y realiza una comparación entre las normas internacionales y las nacionales.

Palabras claves: Vehículos Eléctricos (EV), Equipo de Suministro para Vehículos Eléctricos (EVSE), movilidad eléctrica, sistema de recarga rápida, NEPLAN.

Abstract

The model of electric mobility can be for mass transit and personal transportation. However, it requires infrastructure to make sure the supply of electricity such as internal combustion engine (ICE).

This document presents the evaluation of the technological performance of the Rapid Refueling Stations. The technological evaluation includes the following scenarios: when the recharging station is powered by the electrical network, and when it is supported by renewable generation with storage systems.

The evaluation is carried out with the support of NEPLAN, which is a computer tool for analyzing, planning, optimizing and simulating electricity networks. With the NEPLAN, the different scenarios are simulated in the fault state and in the normal operation.

This document reviews the regulations establishing their scope, and makes a comparison between international and national standards.

Keywords: Electric Vehicles EV - Electric Vehicle Supply Equipment EVSE - Quick Charger – NEPLAN.

Contenido

	Pág.
Lista de Figuras.....	IX
Lista de Tablas	XI
Lista de Siglas y Abreviaturas	13
Introducción	15
Capítulo I: Estado del Arte	17
1.1. Aproximación histórica de los sistemas de transporte con energía eléctrica.....	17
1.2. Estaciones de Recarga Rápida para Vehículos Eléctricos.....	19
1.3. Regulación Técnica aplicada a los EVSE.....	21
1.3.1. Revisión de las Normas Referenciadas en el RETIE en el Artículo Dedicado a los Cargadores de Baterías para los Vehículos Eléctricos	21
1.3.2. Revisión de Normas NTC 2050 y NFPA70 en sus Apartes Dedicados a EVSE	22
1.4. Desarrollo Tecnológico	31
1.4.1. Equipo de Suministro de Vehículos Eléctricos	34
1.4.2. Sistema de Almacenamiento de Energía	37
1.4.3. Sistemas de supervisión y control.....	38
Capítulo II: Diseño y Simulación de la Estación de Carga Rápida	42
2.1. Desarrollo del Diseño Eléctrico de Estación de Recarga Rápida	43
2.2.1. Características de la Carga - EVSE	43
2.2.2. Resultados del Diseño Eléctrico.....	45
Capítulo III: Análisis de la Simulación de la Estación de Carga Rápida	51
3.1. Desarrollo de la Simulación de la Estación de Recarga Rápida.....	51
3.1.1. Análisis de Flujo de Perfiles de Carga para la Estación de Recarga Rápida para EVs	53
3.1.2. Análisis de Flujo de Carga para la Estación de Recarga Rápida para EVs	59
3.2. Análisis de Cortocircuito para la Estación de Recarga Rápida para EVs	69
3.2.1. Análisis de Armónicos para la Estación de Recarga Rápida para EVs.....	83
Capítulo IV: Conclusiones.....	91
4.1. Conclusiones	91
4.2. Contribuciones del proyecto de investigación (Publicaciones)	92
4.3. Futuros Proyectos	93
A. Anexo:	93
A.1. Desarrollo del Diseño Eléctrico de la Estación de Recarga Rápida	93
A.1.1. Selección del Transformador Eléctrico	93
A.1.2. Cálculos de los Conductores Eléctricos	95
A.1.2.1. Intensidad de Media Tensión.....	95
A.1.2.2. Intensidad de Baja Tensión.....	96
A.1.2.3. Cálculo de la Corriente de Cortocircuito en Baja Tensión.....	96
A.1.2.4. Selección de Barras del Tablero de Distribución en Baja Tensión	97
A.1.2.5. Selección de Conductores Eléctricos en Baja Tensión.....	98
A.1.2.6. Cálculo de la Malla de Puesta a Tierra para el Tablero General de Distribución.....	103

A.1.3. Definición de Elementos del Sistema de Estudio	106
A.1.3.1. Condiciones del Equivalente de Red	107
A.1.3.2. Condiciones del Nodo Frontera con la S/E del EVSE.....	107
A.1.3.3. Condiciones en el Transformador de Distribución en la S/E del EVSE	108
A.1.3.4. Condiciones en el Nodo de Baja tensión de Tablero de Distribución General.....	109
A.1.3.5. Condiciones en los puntos de recarga rápida para EV	110
A.1.3.6. Condiciones del Generador PV	111
Bibliografía	113

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Línea de tiempo de los EV's. Fuente: Global EV Outlook, IEA - EVI. [1], [2].....	18
Figura 2. Flujograma del sistema de Supervisión y Control para del proyecto. Producción propia.	33
Figura 3. Curvas de carga rápida en corriente continua Nissan LEAF. [79].....	35
Figura 4. Curvas de carga rápida en corriente continua Volkswagen e-Golf. [79].	36
Figura 5. Mapa de estándares de redes inteligentes de la IEC. [86].....	39
Figura 6. Detalle del Modelo de capas que se plantea con los protocolos SMV, GOOSE y MMS en la norma IEC 61850 [88].....	40
Figura 7. Detalle del Mapa de estándares de redes inteligentes de la IEC para la infraestructura de movilidad eléctrica o "ELECTROBILITYINFRA". [86]	41
Figura 8. Flujograma para el desarrollo del proyecto. Producción propia.	42
Figura 9. Flujograma para la Selección del Transformador. Producción propia.....	45
Figura 10. Flujograma para la Selección del Transformador. Producción propia.....	47
Figura 11. Vista de planta de la malla de puesta a tierra de la subestación eléctrica y el tablero general de distribución. Producción propia.	50
Figura 12. Diagrama unifilar Base de los análisis para la Estación de Recarga en NEPLAN. Producción propia.	52
Figura 13. Curva de carga rápida en corriente continua Volkswagen e-Golf 26 kW incluida en la simulación en NEPLAN para el Flujo de Perfiles de carga [79]. Producción propia.	53
Figura 14. Curva de tensión en EVSE-1 de 20 kW para una carga de un EV Volkswagen e-Golf 26 kW. Producción propia.	54
Figura 15. Curva de corriente en EVSE-1 de 20 kW para una carga de un EV Volkswagen e-Golf 26 kW. Producción propia.....	54
Figura 16. Curva de los perfiles de Potencia Activa y Reactiva en el Transformador de 75 kVA en la alimentación por baja al tablero general donde se conectan las cargas (EVSE) y la generación. Producción propia.	55
Figura 17. Curva de tensión en EVSE 1 para una carga de un EV Volkswagen e-Golf 26 kW. Producción propia.	56
Figura 18. Curva de corriente en EVSE 1 para una carga de un EV Volkswagen e-Golf 26 kW. Producción propia.	57
Figura 19. Curva de los perfiles de Potencia Activa y Reactiva en el EVSE 1 para una carga de un EV Volkswagen e-Golf 26 kW. Producción propia.	57
Figura 20. Curva de los perfiles de Potencia Activa y Reactiva en el Transformador de 150 kVA en la alimentación por baja al tablero general donde se conectan las cargas (EVSE) y la generación. Producción propia.	58
Figura 21. Curva de los perfiles de Potencia Activa y Reactiva en el Transformador de 600 kVA en la alimentación por baja al tablero general donde se conectan las cargas (EVSE) y la generación. Producción propia.	59
Figura 22. Escenario 1: Operación normal, las cargas de la Estación de Recarga Rápida para EV Caso de EVSE de potencia 20 kw. Producción propia.	62
Figura 23. Escenario 1: Operación normal, las cargas de la Estación de Recarga Rápida para EV Caso de EVSE de potencia 50 kW. Producción propia.	63
Figura 24. Escenario 1: Operación normal, las cargas de la Estación de Recarga Rápida para EV Caso de EVSE de potencia 100 kW. Producción propia.	64
Figura 25. Escenario 1: Operación normal, las cargas de la Estación de Recarga Rápida para EV Caso de EVSE de potencia 240 kW. Producción propia.	64
Figura 26. Escenario 2: Circuito abierto en la alimentación a la barra de 480V del transformador por baja tensión en la Estación de Recarga Rápida para EV Caso de EVSE de potencia 20 kW. Producción propia.	65
Figura 27. Escenario 3: Operación normal, las cargas de la Estación de Recarga Rápida para EV se alimenta solo desde el circuito de red local. Producción propia.	66
Figura 28. Diagrama unifilar Base para el análisis de cortocircuito para la Estación de Recarga vista del software NEPLAN para el caso de EVSE de 240 kW de potencia. Producción propia.	69

Figura 29. Representación gráfica de cantidades de cortocircuito según la norma IEC 60909 [59].	71
Figura 30. Escenario 1: Cortocircuito en el Barraje del Tablero general de 480V. Producción propia.	73
Figura 31. Escenario 2: Falla en la Frontera de la Subestación eléctrica de la Estación de Recarga Rápida para EV vista en el diagrama unifilar del NEPLAN. Producción propia.	74
Figura 32. Escenario 3: Operación normal, las cargas de la Estación de Recarga Rápida para EV se alimenta solo desde el circuito de red local vista en el diagrama unifilar del NEPLAN. Producción propia.	75
Figura 33. Forma de onda deformada compuesta por la superposición de la fundamental a 60 Hz de los armónicos 3° y 5° orden para la carga.	86
Figura 34. Escenario 1: EVSE 20 kW Transformador de 75 kVA, Armónicos de 3° y 5° orden inyectados por los EVSE al sistema de la Estación de Recarga Rápida para EV. Producción propia.	89
Figura 35. Escenario 1: EVSE 240 kW Transformador de 600 kVA, Armónicos de 3° y 5° orden inyectados por los EVSE al sistema de la Estación de Recarga Rápida para EV. Producción propia.	90
Figura A1. Vista de planta de la malla de puesta a tierra de la subestación eléctrica y el tablero general de distribución. Producción propia.	106

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Comparación de diferentes modos y niveles de carga para Vehículos Eléctricos [21].	20
Tabla 2. Comparación de secciones según los temas tratados. Producción propia.	23
Tabla 3. Tipos de Equipos de Suministro de Carga para Vehículos Eléctricos EVSE. [14].	27
Tabla 4. Características Ambientales [21].	43
Tabla 5. Características del sistema eléctrico [21].	43
Tabla 6. Características técnicas del EVSE. [25].	44
Tabla 7. Cargas el transformador eléctrico de la estación de recarga rápida (Ver Anexo A.1.2.).[14]	44
Tabla 8. Características del transformador eléctrico de la Estación de Recarga Rápida de acuerdo a la potencia de EVSE. Producción propia.	46
Tabla 9. Memoria de resultados del cálculo de Intensidades de corriente. Producción propia.	48
Tabla 10. Memoria de resultados del Cálculo de los Conductores por Regulación de Tensión. Producción propia.	48
Tabla 11. Memoria de resultados del Cálculo de las Barras del Tablero General de Distribución. Producción propia.	49
Tabla 12. Datos base para las colas de la malla de puesta a tierra. Producción Propia.	49
Tabla 13. Escenarios de operación del sistema, Producción Propia.	61
Tabla 14. Capacidad de corriente de los principales barrajes para los escenarios, Producción Propia.	67
Tabla 15. Resumen de las tensiones en los principales barrajes para la Estación de recarga rápida para EV, Producción Propia.	67
Tabla 16. Transferencia de potencia a través de los transformadores principales y generador de energía renovable asociada, producción propia.	68
Tabla 17. Descripción de las variables más comunes en el cálculo de corrientes de falla según la norma IEC 60909 2015. [59].	70
Tabla 18. Descripción de los criterios de selección de los barrajes de los equipos.	71
Tabla 19. Escenarios de Falla del sistema, Producción Propia.	72
Tabla 20. Comparativo de Variables del Cortocircuito trifásica Barraje de Tablero general 480V en los sistemas de potencias de EVSE de 20kW, 50 kW, 100 kW y 240 kW. Producción Propia.	73
Tabla 21. Escenario 1 de Falla Trifásica, Producción Propia.	76
Tabla 22. Escenario 1 de Falla Monofásica a Tierra, Producción Propia.	76
Tabla 23. Escenario 1 de Falla Bifásica, Producción Propia.	77
Tabla 24. Escenario 1 de Falla Bifásica A Tierra, Producción Propia.	78
Tabla 25. Escenario 2 de Falla Trifásica, Producción Propia.	78
Tabla 26. Escenario 3 de Falla Trifásica, Producción Propia.	79
Tabla 27. Escenario 3 de Falla Monofásica a Tierra, Producción Propia.	79
Tabla 28. Escenario 3 de Falla Bifásica, Producción Propia.	80
Tabla 29. Escenario 3 de Falla Bifásica a Tierra, Producción Propia.	80
Tabla 30. Corrientes máximas de cortocircuito para los barrajes de los tableros y equipos principales de acuerdo a los escenarios estudiados, Producción Propia.	81
Tabla 31. Corrientes valores máximos de falla en cada equipo I_k (kA) de acuerdo a los escenarios estudiados, Producción Propia.	81
Tabla 32. Corrientes valores máximos de falla a tierra en estado estacionario I_k (kA) de acuerdo a los escenarios estudiados, Producción Propia.	82
Tabla 33. Límites de distorsión de tensión eléctrica [69].	85
Tabla 34. Resultados en los nodos de distorsión de tensión eléctrica para el 3° y 5° armónico. Producción propia.	87
Tabla 35. Resultados en los elementos de distorsión de corriente eléctrica para el 3° y 5° armónico. Producción propia.	88

Tabla 36. Resultados en los nodos de distorsión de tensión eléctrica para las potencias de EVSE 20kw, 50 kw, 100 kw y 240 kw. Producción.....	90
Tabla A1. Pérdidas de transformación, elección del transformador por potencia [21].....	94
Tabla A2. Valores de tensión, derivaciones y nivel de aislamiento, elección del transformador por tensiones de MT y BT [21].....	94
Tabla A3. Impedancias de corto circuito [21].	95
Tabla A4. Memoria de resultados del Cálculo de las Barras del Tablero General de Distribución. Producción propia....	97
Tabla A5. Carga de platinas de cobre, según DIN 43671.....	98
Tabla A6. Memoria de resultados del cálculo de intensidades de corriente. Producción Propia.....	99
Tabla A7. Memoria de resultados del cálculo de Caída de tensión.	102
Tabla A8. Datos base para las colas de la malla de puesta a tierra.	106
Tabla A9. Datos base para el Equivalente de red, vista del software NEPLAN.....	107
Tabla A10. Datos base para las condiciones de Nodo de Frontera, vista del software NEPLAN.....	108
Tabla A11. Datos base para las condiciones en el Transformador de Distribución de 150 kVA, vista del software NEPLAN.....	109
Tabla A12. Datos base para las condiciones en el nodo de baja tensión, vista del software NEPLAN.....	110
Tabla A13. Datos base para las condiciones en los puntos de recarga rápida para vehículos eléctricos, vista del software NEPLAN.	111
Tabla A14. Datos base para las condiciones en la Generación Fotovoltaica, vista del software NEPLAN.	112

Lista de Siglas y Abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
<i>M</i>	Metro	M	
<i>Km</i>	Kilómetro	Km	1000 m
<i>km/h</i>	Velocidad (kilómetro por hora)	km/h	
<i>H</i>	Tiempo (horas)	H	
<i>KW</i>	Kilovatio	Kw	1000 J/s
<i>A</i>	Amperio	A	1 C/s
<i>V</i>	Voltio	V	1 J/C
<i>Mtoe</i>	Mega Tonelada Equivalente de Petróleo (Million Tonnes of Oil Equivalent)	Mtoe	42 x 10 ⁹ J

Siglas

AC	Alternating Current- Corriente alterna
BEV	Battery electric vehicle
CCS	Combined Charging System
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
DC	Direct current- Corriente continua
EPRI	Electric Power Research Institute
EV	Electric Vehicle- Vehículo Eléctrico
EVSE	Electric Vehicle Supply Equipment
FOB	Free on Board
HEV	Hybrid Electric Vehicle
ICE	Internal Combustion Engine
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia
IEC	International Electrotechnical Commission

IEA	International Energy Agency
IP	Ingress Protection
ISO	Organización Internacional de Estandarización
IoT	Internet of Things
IoE	Internet of Energy
JEVS	Japan Electric Vehicle Standard
NEC	National Electrical Code
OR	Operador de la Red
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle
RFID	Radio Frequency Identification
SAE	Society of Automotive Engineers
SoC	State-of-Charge
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
THD	Total Harmonic Distortion

Introducción

La matriz energética del modelo de desarrollo actual se soporta en energéticos altamente contaminantes tales como el petróleo y el carbón [1]-[3]. Estos combustibles fósiles se consumen a través tecnologías ineficientes que generan un impacto negativo sobre el ambiente por sus grandes emisiones de Gases de Efecto Invernadero [7].

El sector de transporte presenta el mayor consumo de hidrocarburos a nivel mundial y se ha incrementado considerablemente desde 1973 cuando tenía un 45.4% del total de 2251 Mtoe, y en el año 2012 representó un 63.7% del total de 3652 Mtoe de acuerdo con EIA [3]. El continuo aumento del consumo de hidrocarburos para el transporte representa un desafío en las medidas que mitiguen los cambios adversos producto de la utilización de tecnologías altamente contaminantes e ineficientes a nivel mundial. Frente a este desafío se han generado en el mundo proyectos como la Iniciativa de Vehículos Eléctricos (o EVI por sus siglas en inglés), puesta en marcha desde el 2010, que reúne a los 15 principales países en Asia, Europa, Norteamérica y África, cuya misión es acelerar la introducción y adopción de EVs. EVI tiene como metas para el año 2020 alcanzar ventas de 5,9 millones de EV con existencias de 20 millones de EV, y acumular 2,4 millones de puntos de recarga lenta y 6.000 de recarga rápida [1], [2]. La oportunidad de crecimiento para el uso del EV como opción de transporte limpia, sustentable y con niveles favorables de eficiencia dependerá del desarrollo de la infraestructura necesaria para facilitar el suministro de energía de manera fácil y oportuna.

Para el caso de Colombia, el petróleo y sus derivados son utilizados para impulsar el sector del transporte. Para el año 2011 la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), y la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) establecieron que cerca del 65,3% de la producción del petróleo se exporta, alrededor del 34,6% del petróleo es de consumo interno [9]. En el año 2011 el sector del transporte en Colombia representó aproximadamente 65% del total de la demanda interna de petróleo [9]. En el sector del transporte se consumieron cerca de 10,36 Mtoe en 2011 y según cálculos de la UPME, 1,83 Mtoe fue energía útil y 8,53 Mtoe se constituyeron en pérdidas, de lo que se infiere que la eficiencia de los procesos de transporte ronda el 17,7%[9]. Para los años siguientes las cifras representan valores similares con un leve ascenso en producción [8].

Colombia contemplan alternativas como “programas de reducción en el consumo de energía y eficiencia energética que contribuyan a alcanzar las metas ambientales adoptadas por el Ministerio de Ambiente y

Desarrollo Sostenible” y la “Utilización de vehículos eléctricos e híbridos en los sistemas de transporte masivo y sistemas de transporte limpio” que se observan en la Resolución No. 186 de 2012 del Ministerio de Ambiente Y Desarrollo Sostenible de Colombia y en el “Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás Formas de Energía No Convencionales, PROURE [8]. Estas iniciativas tienen como objetivo fundamental la optimización y racionalización de los recursos naturales en especial los recursos no renovables (como el petróleo) de los cuales Colombia tiene una alta dependencia [6], [10]. Colombia con una capacidad de generación eléctrica instalada de 14.603,3 MW de los cuales el 64.1% corresponde a generación hidráulica, 31,0% pertenece a generación térmica, y aunque este último porcentaje depende de combustibles fósiles, se están realizando inversiones en generación con fuentes renovables [11]. En el sector eléctrico de Colombia, la matriz energética tiene un componente principal en energía renovable que hace propicio el desarrollo de tecnologías fundamentadas en la movilidad eléctrica. Sin embargo, para impulsar la masificación del vehículo eléctrico se deberá realizar inversiones sobre la infraestructura necesaria para construir estaciones de Recargas de Energía Eléctrica para EVs. El desarrollo de infraestructura requiere una evaluación del desempeño tecnológico de estaciones de recarga de vehículos eléctricos.

Este documento presenta la evaluación del desempeño tecnológico de la estaciones de recarga rápida para vehículos eléctricos junto a un sistema de generación renovable asociado como parte del análisis de alternativas que ha surgido en Colombia para revisar tecnologías limpias y eficientes que apoyen el Uso Racional y Eficiente de la Energía. El documento aborda los siguientes temas:

- En el primer capítulo se revisa el estado del arte de la estaciones de recarga para EV y la tecnología disponible para generación renovable, igualmente se revisa las normas nacionales e internacionales sobre EVSE.
- En el segundo capítulo se presentarán los resultados de las simulaciones para establecer el comportamiento de una posible estación de recarga con equipos de carga rápida y se presentarán los resultados de la mediciones realizadas a equipos disponibles en Colombia.
- En el tercer capítulo se realiza el análisis de los resultados presentados en el capítulo 2 y las conclusiones.

Capítulo I: Estado del Arte

Este capítulo contiene una aproximación histórica de la trayectoria de los vehículos eléctricos trazando una línea de tiempo hasta la actualidad y que brinda una visión de hacia dónde se dirige la implementación de los vehículos eléctricos a nivel mundial.

El capítulo también revisa las regulaciones en Colombia para la implementación de los equipos de recarga de vehículos eléctricos siendo este aspecto trascendental para el éxito de la implantación de la tecnología de la movilidad eléctrica en Colombia.

Finalmente, el capítulo presenta una revisión comparativa entre las diferentes normas que existen en Colombia e internacionalmente estableciendo diferencias y coincidencias que determinan la pertinencia de su aplicación en la tarea de implementar la tecnologías de recarga rápida en Colombia.

1.1. Aproximación histórica de los sistemas de transporte con energía eléctrica

La aparición de los motores eléctricos rápidamente derivó en la invención de los vehículos eléctricos en 1832 [2]. El proceso de transformación de los vehículos eléctricos ha pasado por tres etapas: una primera etapa cuando se crea el mercado del EV entre 1851 y 1900 que terminó con el advenimiento del Vehículo de combustión interna ICE, la segunda etapa que comprende desde 1951 a 2000 y se enmarca en la fluctuaciones de los precios del petróleo que anima al mercado a comprar vehículos eléctricos rompiendo nuevamente records de ventas a nivel mundial, y la última etapa que se cuenta desde 2001 hasta la fecha, que se caracteriza por la decisión de las empresas privadas y entes gubernamentales, en desplazar los vehículos ICE con tecnologías de movilidad eléctrica [2]. Un resumen de este tránsito histórico marcado por hitos se puede observar en la figura 1 que fue actualizada con información de informes de la Agencia Internacional de Energía (EIA).

La tercera etapa del proceso de penetración del EV se explica por la inestabilidad de los precios del petróleo y la fragilidad del ambiente asociada al cambio climático que fue desencadenado por la era industrial y su matriz energética basada en combustibles fósiles [3], [6]. Se hace atractiva la masificación de la movilidad eléctrica por la independencia que representa de los combustibles fósiles y su vocación ambientalista por no generar Gases de Efecto Invernadero. Por otro lado, los sistemas de movilidad eléctrica brindan una independencia de los combustibles fósiles y de los problemas derivados como la variabilidad de sus precios y la continua alarma de escasez.

La decisión de implementar la movilidad eléctrica, por los gobiernos se centra en la construcción de la infraestructura necesaria para soportar el tránsito de los vehículos eléctricos tal y como se encuentra hoy día para ICE. Se requieren puntos de recarga eléctrica al alcance de los usuarios del EV y actualmente se observa un incremento de los puntos de recarga de EV a nivel mundial, con un aumento de más de 8 veces para recarga rápida y en más del 50% para puntos de recarga lenta para lograr más de 15.000 puntos de recarga rápida y más de 94.000 puntos de recarga lenta que reporta la IEA [1].



Figura 1. Línea de tiempo de los EV's. Fuente: Global EV Outlook, IEA - EVI. [1], [2]

La implementación de los vehículos eléctricos representa nuevas oportunidades para la industria automotriz como se ha observado en el innovador mercado que se abre en el mundo con avances en: nuevas baterías, nueva electrónica de potencia, vehículos híbridos eléctricos PHEV o HEV, y una nueva forma de integrar los vehículos y la energía a la internet conocido como el Internet de las cosas o “Internet o Things – IoT” [24], el internet de la energía: “Internet of Energy - IoE”. Por otro lado, los vehículos eléctricos traen inherente desafíos sobre todo para la generación y distribución de energía eléctrica tales como: atención a nuevas necesidades de los consumidores, innovación en tecnologías para implementar los cargadores de EV a la red, desarrollo de nuevos estándares para guiar la implementación de las nuevas tecnologías, construcción de nueva infraestructura, y creación de nueva legislación y políticas para la implementación de EV.

La historia de los EVs en Colombia es nueva, el decreto 2658 de 2011 promulgado a través de los ministerios de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Comercio y Hacienda, que reduce aranceles de importación y el IVA durante los próximos 3 años para 2.250 vehículos eléctricos, tales como taxis, automóviles, camperos y camionetas. En cuanto a los EVSE en Colombia no se cuentan con suficientes puntos para carga de vehículos eléctricos [63]. Solamente está en funcionamiento una estación de recarga para vehículos eléctricos en la ciudad de Bogotá que consiste en dos cargadores rápidos en DC y tres cargadores lentos en AC [12].

1.2. Estaciones de Recarga Rápida para Vehículos Eléctricos

Se establece que las estaciones de recarga rápida para vehículos eléctricos como el conjunto de equipos y dispositivos integrados para suministrar energía eléctrica en corriente alterna (AC) o corriente continua (DC) a vehículos eléctricos. Las estaciones de Recarga Rápida tienen como función principal aumentar y soportar la autonomía de EV colocando a disposición de los usuarios del EV energía accesible sin restricción de tiempo o ubicación. Las estaciones de recarga rápida tienen por objetivo: proveer a los vehículos eléctricos las facilidades para cargar los vehículos hasta en un 80% de su carga total en un tiempo que varía entre 15 - 30 minutos con una transferencia de potencia entre 20 kW a 240 kW con corriente de hasta 400 A en suministro de corriente directa. El servicio brindado por la Estaciones de Recarga Rápida está destinado para el público en áreas comunes donde podrá interactuar con otros servicios tales como restaurantes, cafeterías y tiendas de abarrotes.

El propósito de este trabajo busca tener en cuenta los procesos constructivos y los adelantos presentes en tecnología para las características de recarga rápida del nivel de carga 3 o (CHAdeMO) presentadas en la tabla 1.

Tabla 1. Comparación de diferentes modos y niveles de carga para Vehículos Eléctricos [21].

Característica	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Tensión de entrada	208 - 240 V AC	208 - 240 V AC	208 - 600 V
Tensión de Salida	208 - 240 V AC	208 - 240 V AC	0 - 600 V DC
Tipo de corriente	AC	AC	DC
Potencia de salida	1.4 kW	3.6 o 7.2 kW	20 Kw a 240 Kw
Máxima Potencia de Salida	1.9 kW	19.2 kW	240 kW
Tiempo de Carga	12 h (1)	2.5-5 h (1)	20 min (2)
Conector	J1772	J1772	J1772 o CHAdeMO

Notas para la tabla 1: Tiempo de carga una batería de 16 kWh totalmente consumida con una salida típica (1). 80% de la carga completa, es decir, 12 kWh. El estándar CHAdeMO no permite la recarga completa (2).

La estación de carga rápida tipo CHAdeMO DC es adecuada para áreas donde los vehículos eléctricos están aparcados por períodos cortos de tiempo en estaciones de servicio, restaurantes de comida rápida, cafeterías y estacionamientos.

El sistema de Alimentación del Vehículo Eléctrico (EVSE por sus siglas en inglés), incluyen los conductores de fase, neutro y toma de tierra de protección, acoplamiento del EV, clavijas de sujeción, y en general los accesorios, dispositivos, enchufes de salida de potencia o aparatos instalados específicamente para suministro de energía desde el cableado del tablero de distribución hasta el vehículo eléctrico y que permite la comunicación entre ellos si es necesarios [5], [13].

Los equipos de carga para vehículos eléctricos EVSE destinados para estaciones de recarga deben tener como mínimo funciones que brinden seguridad de acuerdo con la norma NFPA 70 y sistemas para el funcionamiento seguro:

- Verificación de que el vehículo está conectado correctamente.
- Comprobación continua de la integridad del conductor de toma de tierra de protección.
- Activación del sistema.
- Desactivación del sistema.
- Selección de la velocidad de carga.
- Determinación de requisitos de ventilación del área de carga.
- Detección/ajuste de la corriente de carga disponible en tiempo real del equipo de alimentación.

- Retención/liberación del acoplador.

1.3. Regulación Técnica aplicada a los EVSE

Para adelantar un proceso de actualización tecnológica en Colombia que conlleve a la masificación de vehículos eléctricos se requiere que la infraestructura de Estaciones Recarga Eléctrica se apoye en una sólida normalización de los requerimientos para instalación y operación, similar a la existente para los vehículos de combustión interna con las estaciones de suministro de combustibles. Actualmente, existe una amplia normalización de los EVSE que se sustenta en normas tanto nacionales como internacionales. Sin embargo, existen entre ambas diferencias las cuales se exploraran en esta sección, teniendo en cuenta las normas más importantes en Colombia para regulación de EVSE.

Para el caso de Colombia, la normatividad se fundamenta en el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas o RETIE y la norma NTC 2050. El RETIE anexa los siete (7) primeros capítulos de la Norma Técnica Colombiana NTC 2050 que incluye el artículo 625 sobre Equipos para Sistemas de Carga de Vehículos eléctricos el cual es el eje de la regulación [4], [5]. Por otro lado, la norma NFPA 70 fue actualizada en varias ocasiones en el artículo 625 para apoyar a la industria automovilística, la cual está en proceso de masificar el segmento eléctrico en Norteamérica. El Código Eléctrico Colombiano (CEC) o NTC 2050 actualizado en 1998, se basa en la edición de 1996 de la norma NFPA 70 o Código Eléctrico Nacional Estadounidense [5]. Desde entonces la norma NFPA 70 ha sido objeto de cinco actualizaciones, contando la última en 2014, suman 53 revisiones desde su primera emisión en 1897 [13].

A continuación se presenta la revisión del RETIE y las normas vigentes en Colombia tales como NTC 2050- 1998 y NFPA 70-2014, en lo concerniente a las disposiciones referentes para equipos para sistemas de carga para vehículos eléctricos, igualmente se revisarán las normas mencionadas como referencias.

1.3.1. Revisión de las Normas Referenciadas en el RETIE en el Artículo Dedicado a los Cargadores de Baterías para los Vehículos Eléctricos

El RETIE rige los requisitos de producto e instalación de los cargadores de baterías para vehículos eléctricos en su sección 20.7 “Cargadores de Batería para Vehículos Eléctricos”.

En el RETIE se hace referencia a la norma Europea IEC 61851 para clasificar los cargadores según el modo de recarga [4], sin embargo, no se utiliza toda la información sobre niveles de tensiones y corrientes eléctricas de la norma IEC 61851 que se presentan para establecer la diferenciación entre los tipos de carga. Se observa que las tensiones y corrientes normalizadas se adoptan de la norma NFPA 70 de 1996 que es un estándar Estadounidense. En este punto se puede recomendar que en el RETIE se establezca

los rangos de tensión y corriente eléctrica para cada uno de los niveles de tensión así mismo que los niveles de potencia eléctrica.

En el RETIE se exige el cumplimiento de “requisitos adaptados de las normas IEC 61851, SAE J1772, UL 2594, UL 2231, UL 991, UL, 1998, UL 2251 y demostrarlo mediante Certificado de Conformidad de Producto” [4]. Dentro de los requisitos se observa que el RETIE exige en su ítem 20.7.1 que los equipos destinados a la carga de baterías para vehículos eléctricos automotores sean “diseñados según las tensiones normalizadas en Colombia y para ser conectados a la instalación eléctrica domiciliaria, instalaciones eléctricas industriales, estaciones de carga o sitios de parqueo” [4]. Sin embargo, se recomienda que se documente en el RETIE la cita donde se pueden hallar las tensiones normalizadas para Colombia para mayor seguridad de los productos que se comercialicen en la Nación.

Las normas IEC 61851 y SAE J1772 regulan la carga de los vehículos eléctricos en Europa y Estados Unidos respectivamente, en tales normas se definen las tensiones y corrientes admisibles para la carga, así como los protocolos de enlace entre la estación de carga y el vehículo eléctrico. Aunque se observan diferencias entre las normas IEC 61851 y SAE J1772, estas no son de fondo y se limitan a los términos tales como “modos” en la IEC 61851 y en la SAE J1772 se refiere a “métodos” y “niveles”. En las normas se observan requisitos similares que se adaptan a los niveles de tensión de las zonas en donde se aplican. Para los conectores las normas IEC 61851 y SAE J1772 establecen requisitos de seguridad, dejando los métodos precisos para su implementación al fabricante, y de igual forma se deja al fabricante la conexión entre el EVSE y el vehículo eléctrico. Por tanto, para la regulación y normalización de los cargadores de batería para vehículos eléctricos en Colombia se recomienda establecer requisitos de seguridad que establezcan métodos y configuraciones precisas para EVSE y que incluyan las conexiones entre EVs.

1.3.2. Revisión de Normas NTC 2050 y NFPA70 en sus Apartes Dedicados a EVSE

Las últimas versiones de las normas NTC 2050 y NFPA 70 comparten muchos aspectos en cuanto a lo fundamental, sin embargo, la NFPA 70 ha sido objeto de varias actualizaciones realizadas cada tres años y la NTC 2050 fue actualizada en 1998 a partir de la versión de la NFPA 70 de 1996.

En la Norma NFPA 70 en su versión del 2014 contiene la sección 626 (Ver la figura 3) que cubre los conductores eléctricos y equipos externos al camión o a la unidad de transporte refrigerado que conecta los camiones o los dispositivos de transporte refrigerado al suministro de energía eléctrica. También cubre la instalación de los equipos y dispositivos relacionados con las instalaciones eléctricas dentro de espacio de estacionamiento para camiones con las facilidades electrificadas para la unidad de refrigeración. La

alimentación eléctrica para los camiones se presenta como un ahorro energético en combustible fósil pues de lo contrario se requeriría mantener el motor ICE a una marcha lenta para proveer la energía al equipo de refrigeración. Este aspecto de la NFPA 70 del 2014 merece ser mencionado ya que está encaminado a brindar independencia de los combustibles fósiles a los equipos auxiliares de mantenimiento de la carga transportada mientras el camión se encuentra estacionado.

Los apartes 511-8 y 511-9 del capítulo dedicado a los Ambientes Especiales de la NFPA 70 se observan disposiciones para áreas clasificadas cuando existan sustancias inflamables cerca a zonas donde estén los vehículos de carga. Igualmente, se observan recomendaciones sobre la ubicación del equipo de carga de baterías y carga de vehículos fuera de las áreas clasificadas en los ítems 511-3 y 511-10. También es útil la sección 511-12 donde se presentan recomendaciones para la instalación de interruptores como protecciones para el personal contra fallas a tierra y finalmente la sección 511-16 donde se brindan los requerimientos generales para la puesta a tierra.

En la sección 625 donde se encuentran las disposiciones dirigidas a los EVSE se observa que la distribución en las dos normas ha cambiado. La norma NFPA 70 está distribuida en tres secciones principales en su cuerpo mientras que la NTC 2050 presenta cinco. Dentro de estas secciones aún se encuentra ítems similares y diferencias que se han presentado en la NFPA 70 como consecuencia de las actualizaciones producto del avance tecnológico.

Las normas conservan el mismo alcance al cubrir los conductores eléctricos, equipos externos a un vehículo eléctrico que conecte el mismo vehículo a un suministro de electricidad por conductividad o inducción, y cubre también la instalación de equipos y dispositivos relacionados con la carga de vehículos eléctricos [5], [13]. A continuación se presenta en la Tabla 2 la comparación de las secciones de las normas de estudio de manera general.

Tabla 2. Comparación de secciones según los temas tratados. Producción propia.

Secciones	NFPA 70	Secciones	NTC 2050
I	Generalidades	A	Generalidades
II	Equipos de construcción	B	Métodos de alambrado
		C	Construcción de equipos
III	Instalación	D	Control y protección
		E	Ubicación de los equipos de alimentación para vehículos eléctricos

- **Generalidades**

Hallazgos en el ítem 625.1

La norma NFPA 70 contiene una serie de modificaciones con respecto a la norma NTC 2050 desde el alcance donde se actualiza la norma ANSI/NFPA 505 versión 2011 y se adicionan las normas: UL 2594 versión 2013 y UL 2202 versión 2009 [13]. Estos estándares tratan sobre la seguridad del equipo de suministro de energía y para el sistema de carga para EV. La norma NTC 2050 mantiene la versión de 1996 de la norma ANSI/NFPA 505 sin incluir las normas UL.

Al no incluirse en la NTC 2050 la actualización de la NFPA 505 en la versión 2013, no se estiman, ni normalizan, ni minimizan los riesgos de incendio y explosión que involucran vehículos industriales motorizados, incluyendo montacargas, tractores, carretillas elevadoras plataforma, carretillas de mano motorizadas y otros vehículos industriales [15]. Tales vehículos están actualmente en circulación en la industria colombiana para solucionar problemas de manejo de materiales y mercancías en sitios cerrados donde hay afluencia de público y donde pueden producir atmosferas toxicas con monóxido de carbono si se utilizan vehículos de combustión interna, por ejemplo: los almacenes de grandes superficies que en su mayoría son de propiedad de empresas multinacionales que operan con tecnologías eléctricas para: montacargas, carretillas, plataformas, entre otros vehículos industriales, en Colombia. En la NFPA 505 se ha actualizado la orientación de seguridad integral que incluye disposiciones relativas a áreas peligrosas o clasificadas [13] y otros lugares como embarcaderos y muelles, camiones de combustible dual, conversión de camiones, mantenimiento, recarga de combustible, operación y extinguidores portátiles, tales temas no se contemplan con la visión actual de seguridad integral en la NTC 2050 y podría convertirse en una subestimación de los riesgos que se pueden materializar en accidentes en la industria colombiana que ya utiliza vehículos eléctricos de carga. En la NFPA 70 del año 2014 no se incluyó la última versión de la norma NFPA 505 del año 2013 sino la versión anterior de 2011 [13]. De realizarse una actualización de la NTC 2050 se recomienda tener en cuenta la versión 2013 de la NFPA 505 [15].

En la norma UL 2594 se abordan los temas de seguridad para los equipos de suministro de vehículo eléctrico y en la norma UL 2202 se tratan los temas de seguridad para los equipos de carga del vehículo eléctrico. Ambas normas no se incluyeron en la NTC 2050 porque estas normas tuvieron su primera edición en 1998 para la UL 2202 y 2013 para la norma UL 2594. Al no incluirse las normas UL 2594 y UL 2202 dentro de la NTC 2050, no se cubren los requisitos de riesgos eléctricos en EVSE.

Hallazgos en el ítem 625.2

En la NFPA 70 se aumentaron las definiciones a doce mientras que la NTC 2050 se conserva las cuatro definiciones de la NFPA 70 en su versión de 1996. En la norma NFPA 70 se consignan en el ítem 625.2 las siguientes nuevas definiciones:

- Adiciona la definición del “Sistema de gestión de cables” que es un producto nuevo listado para vehículos eléctricos y cuya función es la de controlar y organizar longitudes no utilizadas para cables de salida para vehículos eléctricos [13].
- Agrega a la definición de EV el vehículo eléctrico conectable híbrido PHEV como un EV [13].
- Define los sistemas de almacenamiento de energía recargable que incluye los capacitores, baterías y volantes electromecánicos [13].
- Establece que la batería es recargable y el equipo de suministro del vehículo eléctrico es el sistema de recarga de la batería o EVSE [13], ver Tabla 2.
- Define el sistema de protección personal como dispositivos que al actuar en conjunto proporcionan protección contra descargas eléctricas de personal [13].

En las definiciones se describen nuevos elementos y dispositivos producto de desarrollo de la tecnología la movilidad eléctrica que se traduce en sistemas más seguros y versátiles. La combinación de la tecnología de combustión interna con la tecnología del EV en los vehículos conectable híbrido (PHEV) resulta conveniente porque este tipo de vehículos sería los primeros en ingresar al mercado Colombiano según diferentes estudios [16]. Con el sistema de gestión de cables incluida en la norma NFPA 70 se describe un dispositivo que permite al usuario del EVSE utilizar el cable de alimentación sin excesos de longitud, evita enredos y posibles caídas, en la definición se evidencia la utilidad del sistema de gestión de cables. También, se incluyen dentro de las definiciones las nuevas tecnologías de almacenamiento de energía como: capacitores, volantes electromecánicos además de las baterías que ahora se consideran recargables, y para estas se establecen en EVSE. En tales definiciones se advierte un avance tecnológico en cuanto a suministro de energía a EV, sistemas de seguridad y diversificación de tecnologías de EVs que se recomienda que se anexe a la próxima actualización de la norma NTC 2050.

Hallazgos en el ítem 625.3

En el ítem 625-3 de la NTC 2050 se establece la conducta a seguir cuando existan discrepancias con otras secciones de la misma norma donde se da prevalencia a la sección 625 sobre las demás secciones

de la NTC 2050. Este ítem no se encuentra en la NFPA 70. El ítem 625-3 de la NTC 2050 permite anticipar posibles discrepancias dentro de la misma norma, sin embargo, se recomienda una revisión más completa de la NTC 2050 para que posibles disensos sean resueltos y se brinde la claridad que se requiere dado que esta sección hace parte del RETIE.

Hallazgos en el ítem 625.4


En el ítem 625.4 se establece en ambas normas, la NTC 2050 y la NFPA 70 las tensiones eléctricas de los equipos de alimentación eléctrica para vehículos eléctricos EVSE. En este ítem se determinan las siguientes tensiones en corriente alterna 120, 120/240, 208Y/120, 240, 480Y/277, 480, 600Y/347, y 600 voltios para ambas normas. Sin embargo, en la NFPA 70 se agregan tensiones del sistema de corriente continua de hasta 600 voltios para equipos de suministro EVSE. Los tipos de EVSE tienen tensiones características de operación de acuerdo con el nivel de carga como se observa en la tabla 3.

Esa tensión eléctrica en corriente continua hasta en 600 V que normaliza la NFPA 70 es parcialmente consecuente con lo regulado por el RETIE en cuanto a su campo de aplicación en su ítem 2.1 [4] teniendo presente que solo aplica para tensiones iguales o mayores a 24 voltios. Los rangos de tensión en corriente continua correspondería a los EVSE de recarga rápida estandarizados en la norma IEC 61851-1 [17].

Hallazgos en el ítem 625.5

Con el ítem 625.5 se cierra la sección de generalidades con la certificación de productos para la NFPA 70 que por ser norma se presenta como una recomendación. Para el caso de Colombia, existe una regulación en el ítem 2.3 del RETIE [4]. El RETIE por ser reglamento tiene un carácter de obligatoriedad en todos sus aspectos de su alcance, en especial en los temas de certificaciones de materiales, equipos y obras, e incluso cuenta con organismos acreditados para realizar las certificaciones. Estos organismos son avalados por la Superintendencia de Industria y Comercio -SIC y/o por Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC.

Tabla 3. Tipos de Equipos de Suministro de Carga para Vehículos Eléctricos EVSE. [14]

Tipos de EVSE	Tipo de cargador
	Nivel 1: 120V AC, tiempo de carga de 8 a 16 horas.
	Nivel 2: 208V o 240V en AC. Tiempo de carga de 4 a 6 horas.
	Nivel 3: Hasta 600 V DC. Cargador rápido al 80% de la carga o carga completa en 30 minutos en AC o DC

- **Equipos de Construcción**

Este ítem único en la NFPA 70 se dedica a los equipos de construcción, en la NTC 2050 se encuentra integrado como se observa en la Tabla 1: “Métodos de alambrado” y “Construcción de equipos”.

Hallazgos en el ítem 625.17

Dentro de las diferencias más relevantes entre las normas NTC 2050 y la NFPA 70 se observa que la tabla 400.4 referenciada en el inciso 625.17, común en nomenclatura y temática de ambas normas se establecen nuevas características y cualidades para los cables y cordones flexibles, y se agrega el grado de ser resistentes a aceites para los cables para vehículos eléctricos. La tabla 400.4 se presenta en la norma NTC 2050 en un orden diferente a la presentada en la NFPA 70, pues en la NTC 2050 se coloca al final los cables destinados a los vehículos eléctricos

Los temas se presentan en la NFPA 70 en cuanto al punto 625.17 de la siguiente manera:

- Cordones de suministro de potencia.
- Cable de salida al vehículo eléctrico.
- Longitud total para cables y cordones.

En ésta organización de los temas del ítem 625.17 se establecen requisitos adicionales para la colocación de los sistemas de protección para las personas que luego se precisan en el inciso 625.22 que es común en ambas normas. También, se establecen los tipos de cables para ser utilizados en EV como son: EV, EVJ, EVE, EVJE, EVT, o EVJT de acuerdo con la tabla 400.4, los cuales son comunes en ambas normas.

Se aclara que los cables son para vehículos eléctricos y no cables eléctricos para vehículos como se referencia en la tabla 400.4 de la NTC 2050 [5]. Es decir, que su utilización se circunscribe a los vehículos eléctricos y sus equipos para sistemas de carga de EV, y no se refiere a cables de la industria automovilística tradicional.

La longitud total del cable se establece en ambas normas con un máximo de 7,6 m., sin embargo, en la NFPA 70 se hace una excepción cuando se utiliza un sistema de gestión de cable que hace parte de un EVSE [13], debido a que este sistema logra minimizar los problemas derivados por tener longitudes largas en conductores tales como disposición de protecciones, riesgos de caídas por mala disposición del cable de alimentación, entre otros problemas.

Hallazgos en los ítems 625.18 y 625.19

Los incisos 625.18 y 625.19 donde se abordan los temas de enclavamientos por motivos de seguridad, se encuentra en ambas normas pero se observa una variación en la norma NFPA 70 con la excepción para tensiones en corriente continua menores a 50 V DC [13]. El valor de la excepción se observa consistente con los límites tolerables del ser humano [4].

- Instalación

Este ítem único en la NFPA 70 está integrado por dos ítems en la NTC 2050 como se observa en la Tabla 1: “Control y protección” y “Ubicación de los equipos de alimentación para vehículos eléctricos”.

Hallazgos en los ítems 625.29 y 625.52

Dentro de esta sección se encuentra una importante diferencia en la tabla 625.29 [5] que se presenta en la NTC 2050 y lo presentado en la NFPA 70. Para la norma NTC 2050 se observa una sola tabla 625.29 donde se establecen las tensiones y corrientes eléctricas para determinar la ventilación mecánica para cada plaza de aparcamiento dotada de equipo de carga para vehículos eléctricos en metros cúbicos/minuto. La tabla 625.29 de la NTC 2050 se reemplaza en la NFPA 70 por dos tablas: 625.52 (B) (1) y 625.52 (B) (2), en las cuales se adicionan las tensiones y corrientes en DC ≥ 50 V [13].

En el inciso 625.52 de la NFPA 70 se establece la formulación para calcular los caudales mínimos de ventilación mecánica para instalaciones de carga de EV que incluyen valores en corriente directa DC:

Instalación monofásica AC o DC:

$$(1), [13]. \text{ Ventilación (1fase AC o DC) (m}^3\text{/min)} = \frac{(\text{voltios}) \times (\text{Amperios})}{1718}$$

$$(2), [13]. \text{ Ventilación (1fase AC o DC) (ft}^3\text{/min) (cfm)} = \frac{(\text{voltios}) \times (\text{Amperios})}{48.7}$$

Instalación trifásica AC:

$$(3), [13]. \text{ Ventilación (3 fase) (m}^3\text{/min)} = \frac{1.732 \times (\text{voltios}) \times (\text{Amperios})}{1718}$$

$$(4), [13]. \text{ Ventilación (3fase) (ft}^3\text{/min) (cfm)} = \frac{1.732 \times (\text{voltios}) \times (\text{Amperios})}{48.7}$$

En el inciso 625.29 [5] de la NTC 2050 se presentan las formulaciones para calcular los caudales mínimos de ventilación mecánica para instalaciones de carga de EV con las siguientes fórmulas donde no se incluyen valores en corriente directa DC solo de corriente alterna las cuales difieren de la sección 625.52 de la NFPA 70:

Instalación monofásica AC:

$$\text{Ventilación} = \frac{(\text{voltios}) \times (\text{Amperios})}{48.7} \quad (5),$$

[5]

Instalación trifásica AC:

$$\text{Ventilación} = (\text{voltios}) \times (\text{Amperios}) \times 3 \quad (6),$$

[5]

En las fórmulas del inciso 625.29 de la NTC 2050 no se precisan las unidades en que se presenta la ventilación [5].

En la NTC 2050 no se presenta disposiciones para instalar los equipos carga de EV con tensiones en corriente continua con caudales mínimos de ventilación, por tanto no se tiene soporte técnico para minimizar los riesgos de sobrecalentamiento de los sistemas de carga de EV para equipos que se instalen en Colombia. Este es un vacío de seguridad industrial si se observa que la entrada de vehículos eléctricos tendrá su mayor impulso en la industria.

Hallazgos en los ítems 625.46 y 625.48

En la NFPA 70 se abre la opción para que los vehículos eléctricos sean utilizados como fuentes de suministro de reserva de energía en sus incisos 625.46 y 625.48, teniendo en cuenta que los vehículos eléctricos no se podrán utilizar como fuentes de energía eléctrica, a menos que cuenten con los equipos suficientes que permitan alimentación bidireccional tal como se indica en el inciso 625.48, además se recomienda aplicar los artículo 702 y 705 de la NFPA 70 que normalizan los sistemas de reserva opcionales y las fuentes de generación de energía eléctrica interconectadas [13]. Los ítems 625.46 y 625.48 no se encuentran en la NTC 2050.

En la NTC 2050 no se contempla la utilización de EV como fuentes de suministro de reserva, solicitando “instalar un medio que evite que, cuando haya pérdida de tensión desde la red pública de energía u otro sistema o sistemas eléctricos, la energía eléctrica no pueda volver desde el equipo del vehículo hasta el sistema alambrado de la propiedad” como se observa en el ítem 625.25 [5].

La norma NFPA 70 se encamina a la integración a las redes eléctricas de baja y media tensión de fuentes de generación distribuida, generación con fuentes renovables, y redes inteligentes (Smart Grid) que se asocia a ahorros energéticos. También, en la NFPA 70 se prevé la irrupción del EV en las redes eléctricas que potencialmente puede ser utilizado como generación eléctrica distribuida que ayude a aplanar las curvas de potencia de las ciudades como es el caso de Málaga [18].

- Aspectos finales en la revisión de Normas Aplicables en Colombia Sobre EVSE

En Colombia se espera que EV sean una opción de transporte masivo, para tal fin es indispensable que las normas fundamentales tales como la NTC 2050 y el RETIE, se actualicen y adecuen para normalizar las tecnológicas. Se recomienda que se establezcan en las normas nacionales y en el RETIE los protocolos que se deben seguir en la conexión entre la Estación de carga y EV para evitar vacíos y riesgos sin valorar por los fabricantes que pueden afectar a los usuarios de EVSE.

Las normas colombianas tienen su fundamento en las normas Estadounidenses como es el caso de la NTC 2050 y el RETIE que se basan en la norma NFPA 70 de 1996, pero estas normas requieren una

actualización para afrontar los riesgos eléctricos que se derivan de la incursión de nuevas tecnologías como en este caso partículas: movilidad eléctrica. Muchos de los desafíos que enfrentará la generación eléctrica pasará por la irrupción de los vehículos eléctricos y los sistemas de carga para los mismos, por tanto se requiere un soporte técnico que regule en Colombia estas tecnologías hacia las disposiciones de seguridad eléctrica que minimicen accidentes letales en personas, daños a la infraestructura y al ambiente.

La iniciativa de actualizar la NTC 2050 se impulsa por: el avance tecnológico del EV y los sistemas de carga que ingresan a Colombia, la necesidad de anexar las experiencias de otros países que tienen la implementación de la movilidad eléctrica en los planes de desarrollo de ciudades, la revisión de los términos e interpretaciones que se traducen del inglés al castellano, y la masificación del EV que se puede presentar en los próximos años en Colombia.

Parte importante de infraestructura que se requiere para la masificación del EV se traduce en estaciones de Recarga eléctrica con EVSE para alimentar los sistemas de almacenamiento de energía del EV. Tales equipos que se integraran a la red, ya sea a través de redes domiciliarias o públicas, requerirán en Colombia soporte técnico y normativo donde se exijan las mejoras en seguridad como el Sistema de Gestión de cable, esquemas de protección personal, y tensiones de alimentación en corriente continua, para el caso de EVSE rápidos.

Se recomienda que la norma NTC 2050 se observen las opciones de suplir la energía necesaria para alimentar los EV con generación con energías renovables para minimizar los riesgos de accidentes en personas al realizar dicha conexión.

Actualmente, la NTC 2050 y el RETIE adopta la experiencia e investigación a través de normas internacionales, sin embargo, la industria y la investigación Nacional han alcanzado un grado tal de desarrollo que puede aportar a estas normas material relevante en la solución eficiente de problemas que contemplen las realidades ambientales regionales. De no actualizarse las normas NTC 2050 y RETIE se podrían ignorar riesgos eléctricos solucionados en los países donde ya se tiene un trayecto mayor con la experiencia del EV.

1.4. Desarrollo Tecnológico

La tendencia del desarrollo tecnológico para los sistemas evaluados en este trabajo tiene como núcleo el acercamiento a las redes inteligentes [74]. Es así como se presentan a continuación las premisas para el desarrollo e implementación de las redes inteligentes [74]:

1. Aumentar la eficiencia del sistema eléctrico.
2. Incluir tecnologías de energía renovables
3. Mejorar la fiabilidad del sistema eléctrico.
4. Desarrollar nuevos productos, servicios y mercados.
5. Incluir activamente al consumidor.
6. Optimizar la utilización de los activos de la red.

La estación de recarga rápida está alineada con las premisas anteriores al vincularlas de forma inherente a su configuración. Se observa que la primera premisa se concatena en la Estación de recarga rápida de vehículos eléctricos a través del sistema de control y supervisión de la estación de recarga el cual consiste en un protocolo abierto y estandarizado como la norma IEEE 61850 [87], con características que permite la incorporación en las redes eléctricas de tecnologías de información y comunicaciones (TIC) para que sea posible un intercambio bidireccional de datos, la cual es una capacidad básica para la existencia de nuevos servicios, adicionalmente, la norma IEC 61850 permite la supervisión y control en redes inteligentes (Smart Grid) [86], energías renovables y vehículos eléctricos [75], soluciones que se presentan en este trabajo. Lo anterior garantiza que la estación de recarga cumpla con los requerimientos de eficiencia energética [74].

La segunda premisa se resuelve en la estación de recarga rápida con la incorporación de la generación renovable como parte de su sistema, así mismo, por medio de un sistemas de almacenamiento, capaz de reducir o incluso eliminar los picos de consumo que se puedan producir en la recarga rápida de los vehículos eléctricos con lo que se crea un efecto adicional en cuanto al número de cargas simultaneas que se puedan producir [86].

El cumplimiento de la tercera premisa se observa en el presente trabajo donde se determina si la estación de recarga rápida presenta características inocuas al sistema eléctrico convencional, en otras palabras, debe ser altamente compatible electromagnéticamente en cumplimiento del artículo 11 del RETIE [4], sin dejar de lado que debe cumplir con lo estipulado en la norma IEEE 519 [69] sobre la emisión de armónicos en la red, tema abordado en el capítulo 3 de este documento. Esta nueva carga establecida con la estación de recarga rápida debe ser compatible con la red convencional existente.

Las últimas tres premisas se vincularan una vez se masifique la operación de las estaciones de recarga rápida y encuentren una asociación de los usuarios, operadores y aparezca el “prosumidor” dentro del esquema consumo y producción [74], [85].

Las estaciones de recarga de vehículos eléctricos que se evalúan en este trabajo, hacen parte de las soluciones brindadas dentro de las tecnologías de redes inteligentes, es así que las estaciones integran los siguientes sistemas eléctricos:

- Estaciones de recarga (EVSE),
- Sistema de almacenamiento de energía,
- Sistema generación renovable de energía, y
- Sistemas de supervisión y control.

Los sistemas involucrados en la Estación de Recarga rápida actúan deben ser supervisados y controlados con el objetivo de procurará la armonía necesaria entre estos sistemas utilizando las comunicaciones entre sus componentes de manera bidireccional. La figura 2 establece el direccionamiento de las comunicaciones entre cada componente del sistema de la Estación de carga rápida converge en el Sistema de Supervisión y de Control.



Figura 2. Flujograma del sistema de Supervisión y Control para del proyecto. Producción propia.

El desarrollo tecnológico de las estaciones de recarga de vehículos eléctricos (EVs) y generación renovable asociada debe facilitar la entrada del vehículo eléctrico en Colombia. Para facilitar la entrada

del vehículo eléctrico se debe implementar una infraestructura de recarga de energía eléctrica masiva la cual debe conectarse como carga adicional a la red eléctrica convencional existente.

1.4.1. Equipo de Suministro de Vehículos Eléctricos

Los equipos de suministro de vehículos eléctricos rápidos se encuentran alineados en su capacidad a la capacidad y autonomía de los vehículos a atender, es así como en el mercado se encuentran más comúnmente equipos de suministro de EV con una capacidad de 50 kW y con menos frecuencia existen de capacidades que superan los 100 kW, dado que estas capacidades de potencia se relacionan directamente con la potencia de las baterías de los vehículos que van a llenar [79].

Sin duda los EVSE se harán más potentes hasta abarcar los rangos que se indican en las normas internacionales [21] tengan un rango de potencias desde 20 kW a 240 kW. Estos rangos de potencia de los equipos de suministro definen el tamaño del mismo así como la potencia de las baterías dispuestas en los vehículos definen el tamaño y la capacidad de los equipos de suministro, aun así, se pueden observar normas para instalación de estaciones de carga rápida como RA8-031 –“Instalación De Estaciones De Carga Para Vehículos Eléctricos” [77], donde la empresa distribuidora de energía considera una potencia de 50 kW para equipos de suministro de EV rápidos, con lo cual la empresa de distribución de energía anticipa que el crecimiento de la carga debido a cargadores rápidos tiene un tope de 50 kW por unidad instalada.

En la actualidad se observan tres tipos de carga rápida de corriente continua: CHAdeMO, Sistema de carga combinada (CCS) y Supercargador Tesla [79]. Sin embargo, las diferentes tecnologías de paquetes de baterías implementadas en los vehículos que pueden ser (Batería de Plomo-Acido (Pb), Batería Níquel-Hidruro Metálico (Ni-MH), Batería de iones de litio (Li-ion), entre otras), como también los diferentes tipos de métodos de cargas que pueden ser: Voltaje constante, Corriente constante, Corriente no controlada (Taper current), Carga por pulsos, Carga de pulso negativo (Burp charging, Reflex or Negative Pulse Charging), Carga IUI, Carga de goteo (Trickle charge), Carga de flotador (Float charge) y Carga aleatoria, hacen que el modelamiento de un equipo de suministro para vehículo eléctrico requiera de escoger el tipo de tecnología entre los paquetes de baterías, el método de carga, el método de control de carga y el modo de carga, este último determinado para este trabajo en el modo rápido. No hace parte del alcance de este trabajo el modelamiento de un equipo de recarga rápida para vehículos eléctricos, sin embargo, con el propósito de realizar la evaluación tecnológica de las estaciones de recarga de vehículos eléctricos (EVs) y generación renovable asociada se simula la carga del EVSE de forma simplificada teniendo en cuenta

los efectos de su consumo en la red convencional y su comportamiento en inyección de armónicos a la red existente.

Es de anotar que la carga rápida no alcanza el 100% de SoC, es un impedimento tecnológico ya que las celdas de la batería se saturan evidenciándose esto en el aumento de la temperatura, dicho aumento puede causar daños en la batería o disminución en su vida útil, este fenómeno se observará en la revisión de las curvas de carga rápida de algunos paquetes de vehículos eléctricos en este documento.

A continuación se observa la curva característica de carga rápida de algunos vehículos eléctricos que se encuentran en el mercado.

En la figura 3 se observa que las curvas del Nissan LEAF se pueden conseguir en tres versiones. Inicialmente se tuvieron disponibles las versiones: 24 kWh y 30 kWh. De acuerdo con la figura 3 la versión de 30 kWh se comporta mejor en carga rápida al llegar hasta el 80% de su SoC que las otras dos versiones, inclusive la última versión que es más potente con 40 kWh que llega hasta 60% de su SoC y luego se ralentiza la carga.

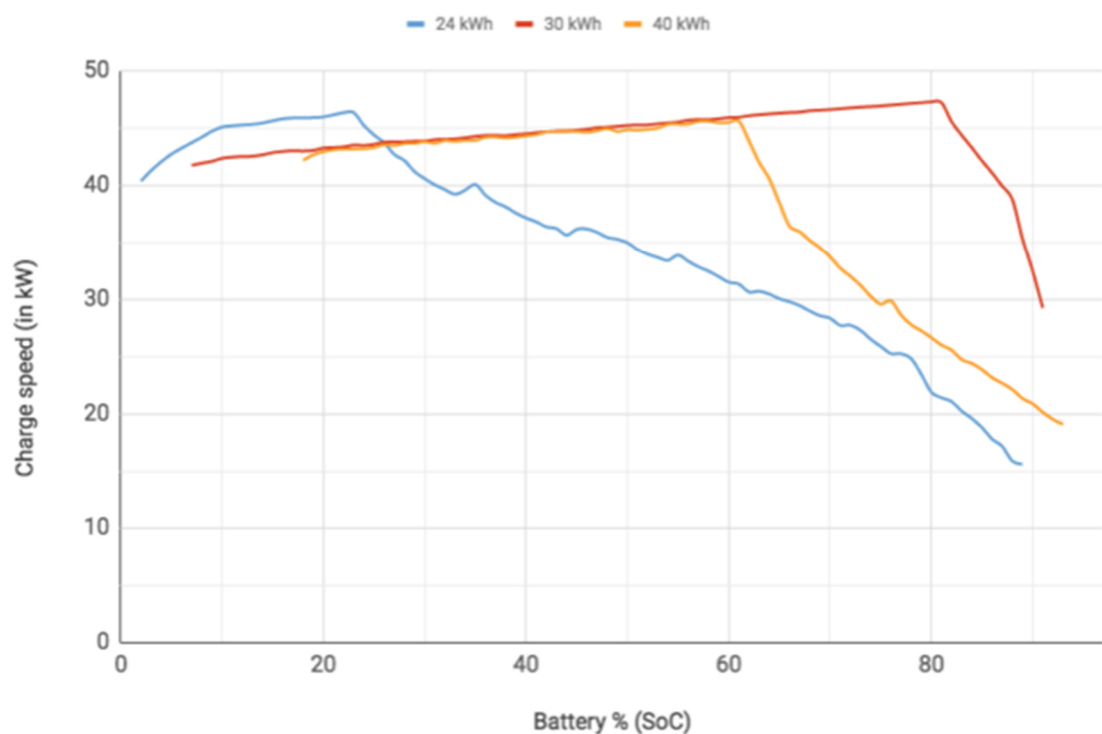


Figura 3. Curvas de carga rápida en corriente continua Nissan LEAF. [79].

En la figura 4 se observan las curvas de carga rápida del Volkswagen e-Golf que presentó un modelo de EV con un paquete de baterías de 24,2 kWh y después actualizó a uno con mayor capacidad de 35,8 kWh. Es así como en la figura 4 se observa que el EV con el paquete de 24,2 kWh tiene un mejor comportamiento en su curva de carga manteniendo una potencia de carga por encima de los 45 kW hasta llegar al 75% de su carga, después se ralentiza.

El segundo modelo del EV, el Volkswagen e-Golf, a pesar de tener un paquete de baterías con mayor capacidad (35,8 kWh) y de llegar a alcanzar un 80% de su carga, no llega a alcanzar la potencia de 40 kW como si lo logra su modelo anterior, tal comportamiento es propio de paquetes de baterías que carecen de sistemas de enfriamiento [79].

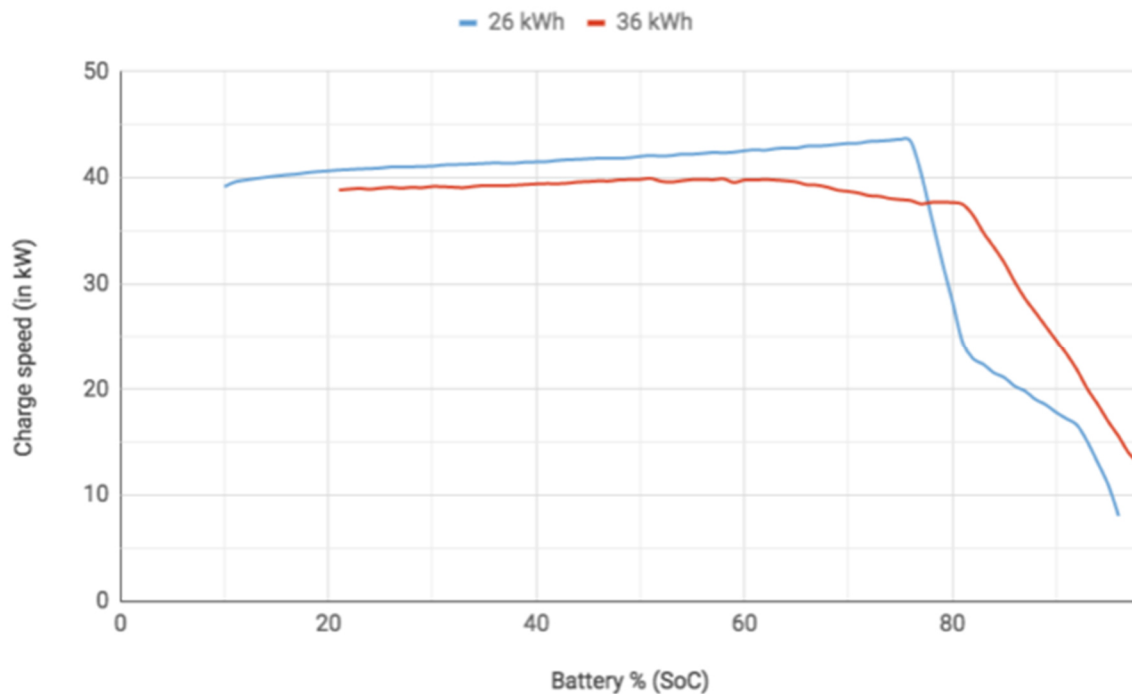


Figura 4. Curvas de carga rápida en corriente continua Volkswagen e-Golf. [79].

Es necesario que los equipos de suministro de vehículos EV rápidos armonicen con la corriente de carga con los sistemas de baterías aun teniendo en cuenta que cada sistema de almacenamiento tiene requisitos diferentes de aceptación de carga. Sin embargo, es recomendable que los EVSE presenten en sus manuales los tipos de baterías a los cuales están dirigidos de acuerdo al modelo de los vehículos. La información de los fabricantes de baterías relacionada con las tasas de carga como función del Estado de

la Carga (SoC) no está publicada por estar patentada. En este orden de ideas, es recomendable que prevalezca para los equipos de suministro de vehículos eléctricos un sistema de administración de batería o BMS por sus siglas en inglés (Battery Management System) con lo que se subsanará daños en la batería del vehículo [78].

Por último, los cargadores de vehículos eléctricos o equipos de suministro rápido deben ser unidireccionales dado que son instalados en electrolineras donde los vehículos estarán colocados por corto tiempo durante el tiempo de la carga de baterías y no se requiere que estos vehículos inyecten energía a la red [78]. Tales cargadores unidireccionales utilizan un puente de diodos en conjunto con un filtro y un convertidor DC-DC [78].

1.4.2. Sistema de Almacenamiento de Energía

Para la aplicación que se aborda en este trabajo, los sistemas de almacenamiento se encuentran dirigidos a soportar la estación de recarga rápida, por tanto se encuentra asociado al sistema de generación renovable que tiene como función el mantener este sistema de almacenamiento cargado para suplir la demanda de la estación.

La estación de recarga se encuentra conectada a un sistema de distribución eléctrica convencional la cual suministra energía principalmente a la estación, es así como el sistema de almacenamiento se comporta como una suplencia en un escenario y en otro escenario como un sistema que contribuye al aplanamiento de la curva de demanda de la estación de recarga [74].

Frente a la recomendación del uso de tecnologías de almacenamiento de energía, que en esta aplicación se observa para generación renovable distribuida, es muy recomendable las baterías de ácido-plomo regulada por válvula (VRLA) o mejor conocidas como baterías selladas o libre de mantenimiento, dado que se puede montar en espacios pequeños y con poca ventilación, son de bajo costo y mantenimiento, y son del tipo recargable [76], [78]. Por otro lado, se están realizando avances hacia la durabilidad de las baterías VRLA que pueden mitigar el hecho de ser construidas con compuestos tóxicos como el plomo dado que los tiempos de obsolescencia se alargan [80].

Otra tecnología muy recomendable para la aplicación de la estación de recarga rápida son los paquetes de baterías de ion litio las cuales se caracterizan por tener el potencial de la célula es elevado ($\sim 3.7V$), donde una sola célula tiene valores equivalentes en tensión eléctrica que tres baterías alcalinas en serie; por otro lado, presenta una densidad de energía más elevada que su equivalente en níquel (desde 250 a 730 Wh/L²) lo que lleva a que tenga más energía acumulada por unidad de peso y volumen [76]. Otra

característica deseada es su capacidad de recibir carga en cualquier momento lo que la hace más versátil al no tener que depender de tiempos de espera por el completamiento de su ciclo de carga – descarga.

Una tercera tecnología recomendada para la aplicación de estaciones de recarga rápida asociada con energía renovable son los ultra condensadores los cuales tienen en su ventaja principal la de tener alta densidad de potencia [82]. Así mismo, los ultracondensadores presentan un ciclo de vida útil prolongado, y podrían mejorar la eficiencia de los sistemas FV cuando se los somete a cargas máximas [82], igualmente su menor tamaño y peso a los de baterías convencionales junto a su buen comportamiento en temperaturas extremas lo hacen muy recomendable para ser utilizado en la infraestructura de Estaciones de recarga rápida a lo largo de Colombia.

En cuanto al método de carga sea dinámico dado que permite que la condición aleatoria y no controlada como recibe la energía el paquete de batería o el sistema de almacenamiento tenga restricciones que permitan dosificar, controlar y gestionar la corriente de carga o de voltaje a niveles que el sistema de almacenamiento pueda tolerar aumentando la vida útil de los sistemas de almacenamiento [76], [78]. Este método de carga es clave en el aumento de eficiencia en el conjunto integrado de la estación de recarga rápida dado disminuye la curva de demanda del sistema a la red eléctrica convencional lo que ayuda a aplanar la curva de demanda y por consiguiente optimiza el uso de la red de distribución convencional disminuyendo el impacto que supone la carga de los equipos de suministro de vehículos eléctricos EVSE a la red convencional [81].

1.4.3. Sistemas de supervisión y control.

El sistema de supervisión y control para la estación de recarga rápida está normalizado por la Comisión Electrotécnica Internacional o IEC por sus siglas en inglés. En la figura 5 se observan las normas que operan en las redes inteligentes de acuerdo con su función, permitiendo clasificar las normas IEC de acuerdo con el uso y el proceso en un formato de mapa de estándares de redes inteligentes el cual también se actualiza constantemente.

En la figura 5 se observa que la infraestructura para movilidad abarca las Estaciones de Recarga y entre ellas las estaciones de recarga rápida que se clasifica en el renglón de uso final o consumo. Dentro de las normas IEC reportadas para la sección de infraestructura de movilidad eléctrica o “ELECTROBLITYINFRA” está la norma IEC 61850 que define los protocolos de comunicación para dispositivos electrónicos inteligentes (IED por sus siglas en inglés) en subestaciones eléctricas la cual tiene la virtud de integrar las funciones de control, medición, supervisión y protección para una subestación eléctrica con la versatilidad

de la Ethernet que tiene un sustancial ahorro en cableado. La norma IEC 61850 está dirigida para subestaciones eléctrica, sin embargo se puede implantar en sistema de redes inteligentes (Smart Grid), generación renovable y movilidad eléctrica, así como las estaciones de recarga rápida para vehículos eléctricos.

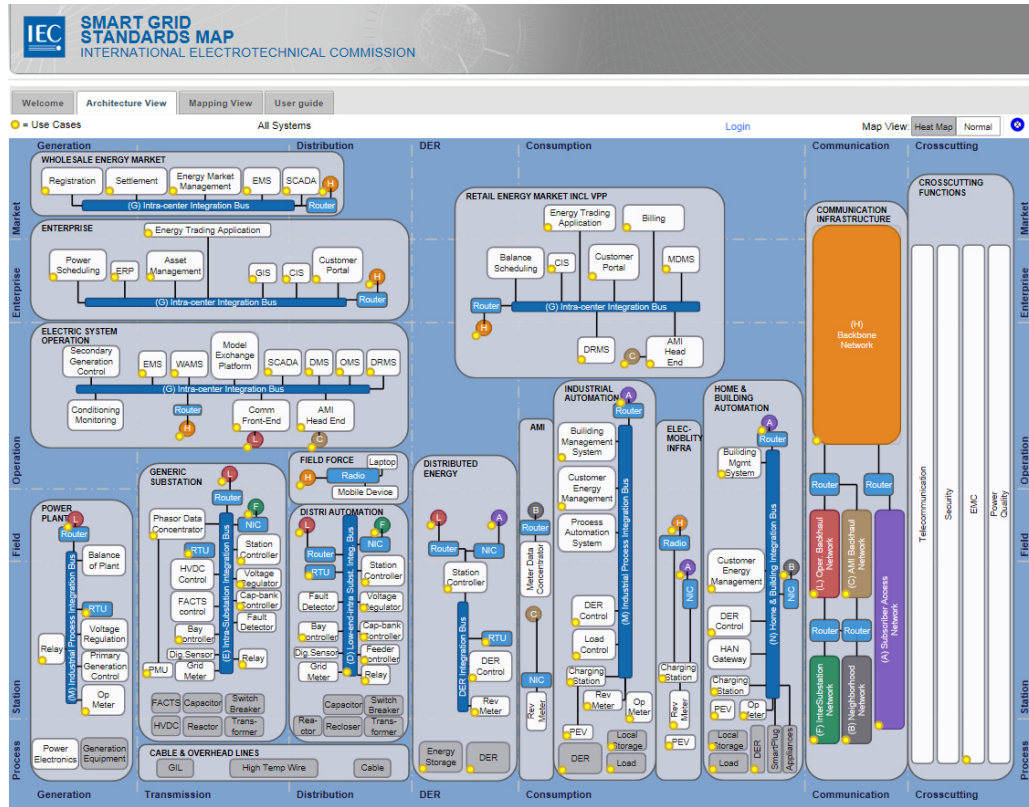


Figura 5. Mapa de estándares de redes inteligentes de la IEC. [86]

La norma IEC 61850 es un protocolo abierto donde los distintos fabricantes de equipos pueden proponer diferentes sistemas de control con un modelado, una configuración y comunicaciones bajo la implantación de las redes de área local o LAN por sus siglas en inglés, que plantea el surgimiento de nuevos mercados de servicios en tecnologías de la información (TIC). Los protocolos base de la norma IEC 61850 son los siguientes [88]:

1. El MMS (Manufacturing Message Specification) o Especificación de mensajes de fabricación, cuya aplicación en un principio fue de aplicación industrial bajo la norma ISO 9506 que garantiza que todo el manejo de la comunicación sea el mismo sin importar el tipo de red o de dispositivos conectados [88].

2. El GOOSE (“Generic Object-Oriented Substation Events” o eventos de subestación genéricos orientados a objetos) que es una herramienta efectiva en la distribución de información de estado que permite que cualquier dispositivo electrónico inteligente [88].
3. Y por último el protocolo SMV o “Sampled Measured Values” o Valores medidos muestreados que aporta a la norma IEC una vía rápida de comunicación de valores de control, medición y protección a través de Ethernet (Capa 2 OSI) con el formato emisor – suscriptor que significa que el emisor que de igual manera que el protocolo GOOSE, el SMV es utilizado para el envío de datos en tiempo real [88].

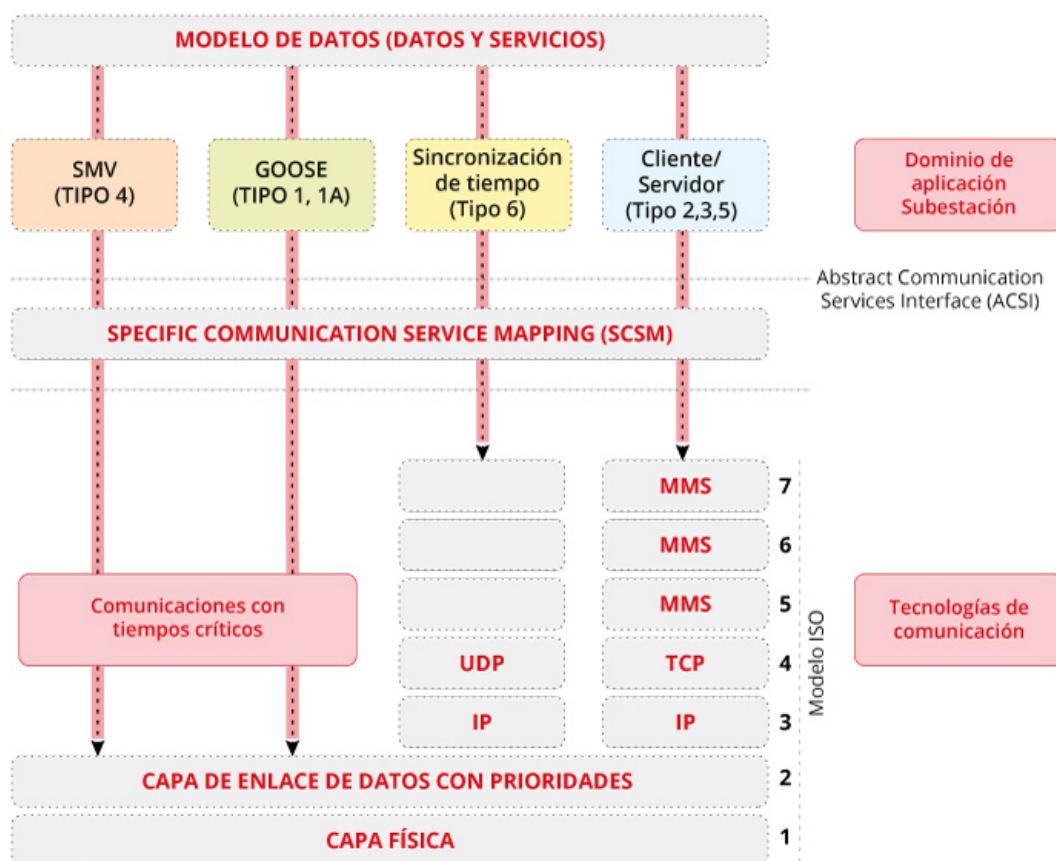


Figura 6. Detalle del Modelo de capas que se plantea con los protocolos SMV, GOOSE y MMS en la norma IEC 61850 [88].

De acuerdo con la experiencia internacional en ciberseguridad implementar la norma IEC 61850 se debe complementar con la norma IEC 62351 teniendo en cuenta la experiencia adquirida en los ataques y los análisis de riesgo realizados a partir de las lecciones aprendidas.

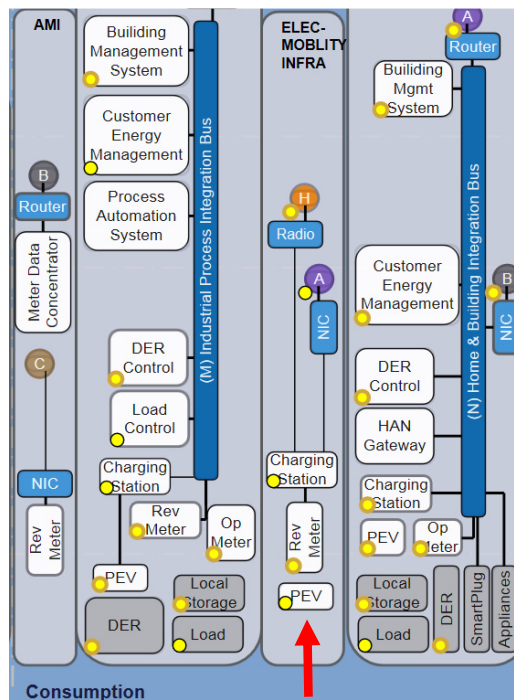


Figura 7. Detalle del Mapa de estándares de redes inteligentes de la IEC para la infraestructura de movilidad eléctrica o “ELECTROMOBILITY INFRA”. [86]

De acuerdo con la experiencia internacional en ciberseguridad implementar la norma IEC 62850 se debe complementar con la norma IEC 62351 para que la seguridad sea robusta y los sistemas tengan un grado mayor de confiabilidad contra posibles riesgos de invasión a la plataforma de sus procesos. Se debe realizar un análisis de riesgos informáticos para determinar los posibles escenarios a los cuales se puede enfrentar la infraestructura de una estación de recarga rápida la cual debido a los protocolos antes mencionados es susceptible a los siguientes ataques [88]:

1. Inundación o el de inyección de mensajes capturados.
2. Captura de paquetes, en los que se extraen información sobre las comunicaciones y se cambia por información falsa.
3. Inundación en los dispositivos suscriptores de los datos, que afectarían a su disponibilidad.

Los anteriores ataques son debido a la debilidad intrínseca de los protocolos SMV y GOOSE por su condición de envío de información en múltiples redes hacia múltiples destinos conocido como multidifusión o difusión múltiple (Multicast en inglés).

Capítulo II: Diseño y Simulación de la Estación de Carga Rápida

El diseño y simulación de estación de recarga rápida se centra en el análisis de los efectos sobre la red eléctrica y el comportamiento del sistema eléctrico de la estación de carga rápida. En el proceso se han observado otros aspectos como la normatividad técnica existente a nivel Nacional e Internacional, que apoye el desarrollo de las instalaciones de EVSE. En el diseño y la simulación se observa los desafíos fundamentales de la carga rápida que se encuentra en torno a cuatro potencias de estudio que comprenden el intervalo de potencias de entre 20 Kw a 240 Kw de la norma SAE: 20 kW, 50 kW, 100 kW y 240 kW. Actualmente la potencia más utilizada está alrededor de los 50 kW, esto es motivado por la capacidad de los bancos de baterías de los EV's. Esta capacidad en los EVSE de 50 kW tiende a condicionar los desarrollos de ingeniería y construcción de las actuales redes eléctricas de distribución a entregar este rango de potencias sin saturarse, sin embargo, la tendencia es aumentar la capacidad de los EVSE hasta más allá del límite de 240 kW y esto motivado en suministrar energía en bancos de baterías de EV's más potentes debido al aumento en la autonomía de los vehículos. La figura 8 muestra el flujograma que señala el desarrollo del proyecto.

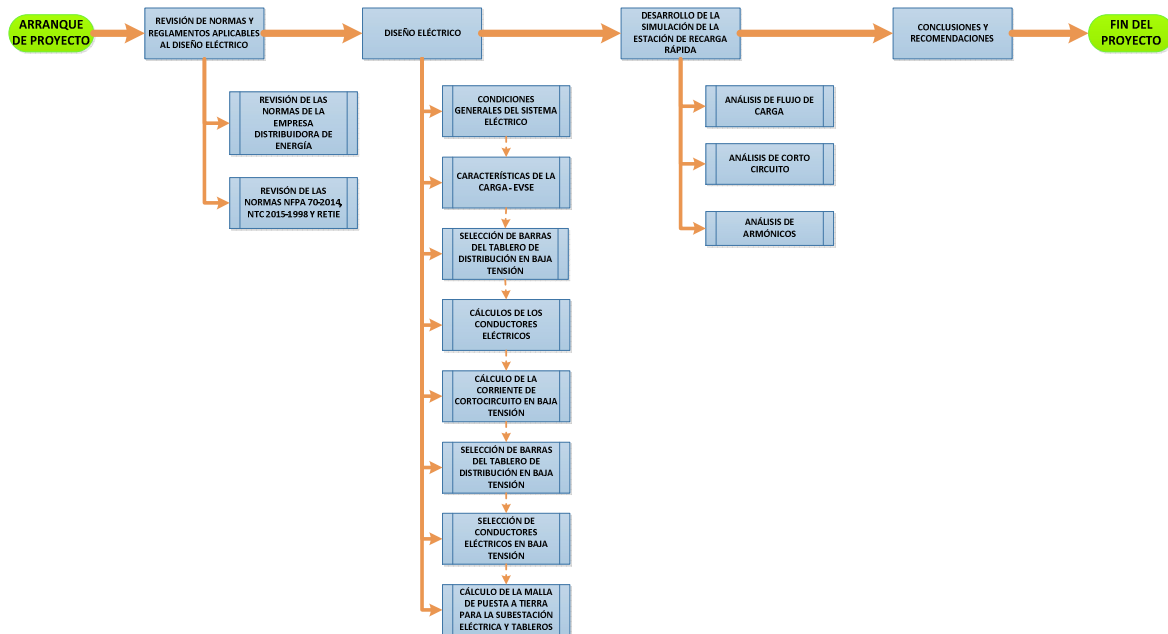


Figura 8. Flujograma para el desarrollo del proyecto. Producción propia.

2.1. Desarrollo del Diseño Eléctrico de Estación de Recarga Rápida

El diseño eléctrico de la Estación de Recarga Rápida tiene como alcance la especificación de los equipos principales, memorias de cálculos de selección del transformador y conductores eléctricos, las memorias de cálculos del Sistema de Puesta a Tierra y el diagrama unifilar. Los cálculos de diseño realizados para el desarrollo del actual trabajo se soportan en las características de los equipos de suministro de vehículos eléctricos con las siguientes potencias: 20 kW, 50 kW, 100 kW y 240 kW, como modelo de soporte. En el anexo A se encontrarán los modelos de los cálculos realizados para una de las potencias (50 kW). Los cálculos sustentan los análisis realizados sin que se omitan los análisis en las potencias límites de la norma SAE J1772 las cuales se revisan en este documento. Las memorias de cálculos se encuentran como anexo A de este documento.

Se establece el diseño para las condiciones de la Ciudad de Bogotá que se resumen en las tablas 4 y 5.

Tabla 4. Características Ambientales [22].

CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES	
a. Altura sobre el nivel del mar	2700
b. Humedad relativa:	90%
c. Temperatura ambiente máxima:	30 °C
d. Temperatura ambiente mínima:	-2 °C
e. Temperatura ambiente	14 °C

Tabla 5. Características del sistema eléctrico [22].

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	
Tensión Nominal	11400, 13200 V
Tensión Nominal secundaria	208 / 120 V, 380/220 V, 480/ 277 V
Frecuencia	60 Hz
Tipo de conexión	Trifásica

2.2.1. Características de la Carga - EVSE

Se tomaron para el desarrollo de los diseños y memorias de cálculos, los cuales se encuentra en la sección de los anexos, las características de la tabla 6, se presentan las potencias de estudio para este trabajo, además se presenta una tabla de características de las potencias que son foco de análisis [25].

Tabla 6. Características técnicas del EVSE. [25]

Ítem	Descripción	Unidad	Características de EVSE			
			Cantidad**	Cantidad *	Cantidad**	Cantidad**
1	Potencia Activa	kW	20	50	100	240
2	Factor de Potencia		0.95	0.95	0.95	0.95
3	Tensión Eléctrica de entrada	V	480	480	480	480
4	Número de fases		3	3	3	3
5	Corriente de entrada (AC) máxima	A	50.6	64	126.61	303.87
6	Frecuencia	Hz	60	60	60	60
7	Eficiencia	%	>90	>90	>90	>90
8	Corriente de salida máxima DC	A	50	120	-	-
9	Tensión de salida máxima DC	V	100-500	100-500	-	-
10	Precisión de tensión eléctrica	%	1	1	-	-
11	Precisión de corriente		0.5 A o 5%	0.5 A o 5%	-	-

*Corresponde a la tabla de características existente en el mercado.

** Los valores son supuestos para realizar el diseño eléctrico y Análisis de la Simulación de la Estación de Carga Rápida.

La tabla 7 presenta un resumen de las cargas diversificadas de los EVSE para la estación de recarga rápida de acuerdo con las capacidades de los Equipos de suministro para las potencias foco de análisis en el presente trabajo. En el Anexo A.1.2., se encuentra un ejemplo de cálculos para un EVSE de capacidad de 50 kW.

Tabla 7. Cargas el transformador eléctrico de la estación de recarga rápida (Ver Anexo A.1.2.).[14]

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	CARGA	FACTOR DE	CARGA
	TOTAL	INSTALADA	DIVERSIDAD	DIVERSIF.
		(KVA)		(KVA)
RECARGADORES RÁPIDOS (20 kW)	2	21,05	1	42,11
RECARGADORES RÁPIDOS (50 kW)	2	52,63	1	105,26
RECARGADORES RÁPIDOS (100 kW)	2	105,26	1	210,53
RECARGADORES RÁPIDOS (240 kW)	2	252,63	1	505,26

2.2.2. Resultados del Diseño Eléctrico

A continuación se presentan los resultados del diseño del sistema eléctrico para la Estación de Recarga Rápida para EVs. Los desarrollos de los cálculos y procesos de selección de equipos se encuentran en la sección de anexos de este documento.

- Selección del Transformador Eléctrico

El proceso de escogencia del transformador sigue el diagrama de flujo de la figura 9, donde se observa que la revisión de las características técnicas de los elementos conectados al sistema que suman cargas al sistema resulta la línea base de partida para la escogencia de la capacidad del sistema, de igual forma se debe revisar las normas técnicas de la empresa de distribución de energía para establecer las potencias normalizadas disponibles para los transformadores de distribución y las características técnicas que la empresa admite en sus redes de distribución. Una vez revisado esta documentación se suman las cargas y se selecciona la capacidad del transformador para que pueda alimentar las cargas actuales con una reserva que puede anticipar cargas futuras. Para este estudio se consideraron reservas para cargas auxiliares como iluminación y tomacorrientes con un valor de 22.5 kVA equivalente a un 15% de la capacidad del transformador dejando una reserva de 22.24 kVA equivalente a un 14,8% de la capacidad del transformador. El desarrollo de los cálculos de la escogencia del transformador se pueden observar en la sección de anexos, en el ítem A.1.1. Selección del Transformador Eléctrico.

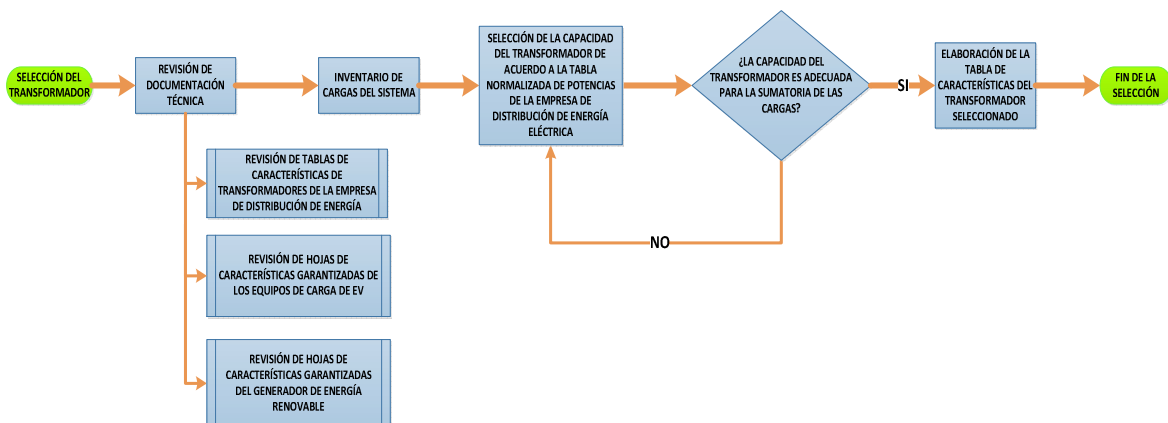


Figura 9. Flujograma para la Selección del Transformador. Producción propia.

El proceso de selección del transformador tiene como resultado que se requiere un transformador con el neutro accesible externamente y sólidamente puesto a tierra siguiendo las características solicitadas por el operador de red [22]. La capacidad es para suministrar energía suficiente para la carga de interés y para sistemas de servicios auxiliares tales como iluminación y tomas que se requieran en el establecimiento asociado o la

infraestructura adyacente a la estación de carga de EV que se estiman en 30 kVA y lo restante (15 kVA) corresponde a potencia disponible para futuras aplicaciones.

Tabla 8. Características del transformador eléctrico de la Estación de Recarga Rápida de acuerdo a la potencia de EVSE. Producción propia.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS TRANSFORMADOR				
		UNIDAD	VALOR	VALOR	VALOR	VALOR
1	Potencia continua nominal a 2700 m y 30 °C ambiente.	kVA	75	150	225	600*
2	Tensiones a potencia nominal en la derivación principal.					
2.1	Alta tensión	kV	13,2	13,2	13,2	13,2
2.2	Baja tensión	kV	0,48	0,48	0,48	0,48
3	Grupo de conexión		Dyn5	Dyn5	Dyn5	Dyn5
4	Frecuencia	Hz	60	60	60	60
5	Impedancia de cortocircuito referida a 85, U °C (%)	%	3,5	4	4	4
6	Tipo de Refrigeración		Aceite	Aceite	Aceite	Aceite
7	Norma		Codensa	Codensa	Codensa	No aplica
8	Temperatura de Operación	°C	55	55	55	55

*La potencia de este transformador no se encuentra normalizada en la tabla de características de Codensa donde se escogieron los transformadores [22].

- Selección de los Conductores Eléctrico

El proceso de escogencia de los conductores eléctricos sigue el diagrama de flujo de la figura 10. Para este proceso se requiere que los cables sean seleccionados para la corriente nominal de cada una de las cargas, para los equipos de carga de EVs se debe establecer con la tabla de especificaciones técnicas de fabricante del equipo, la corriente de entrada máxima de equipo para dimensionar el conductor de acuerdo a la corriente de alimentación máxima que suele diferir de la corriente nominal del EVSE. Para los conductores eléctricos que alimentan los EVSE se estima un 25% más en la intensidad prevista para el cable como seguridad considerando que puede presentar aumentos de corriente propios del funcionamiento del equipo, ver la tabla 9. Para los generadores y la alimentación al tablero desde el transformador se establece las corrientes nominales para la selección de los calibres de los conductores.

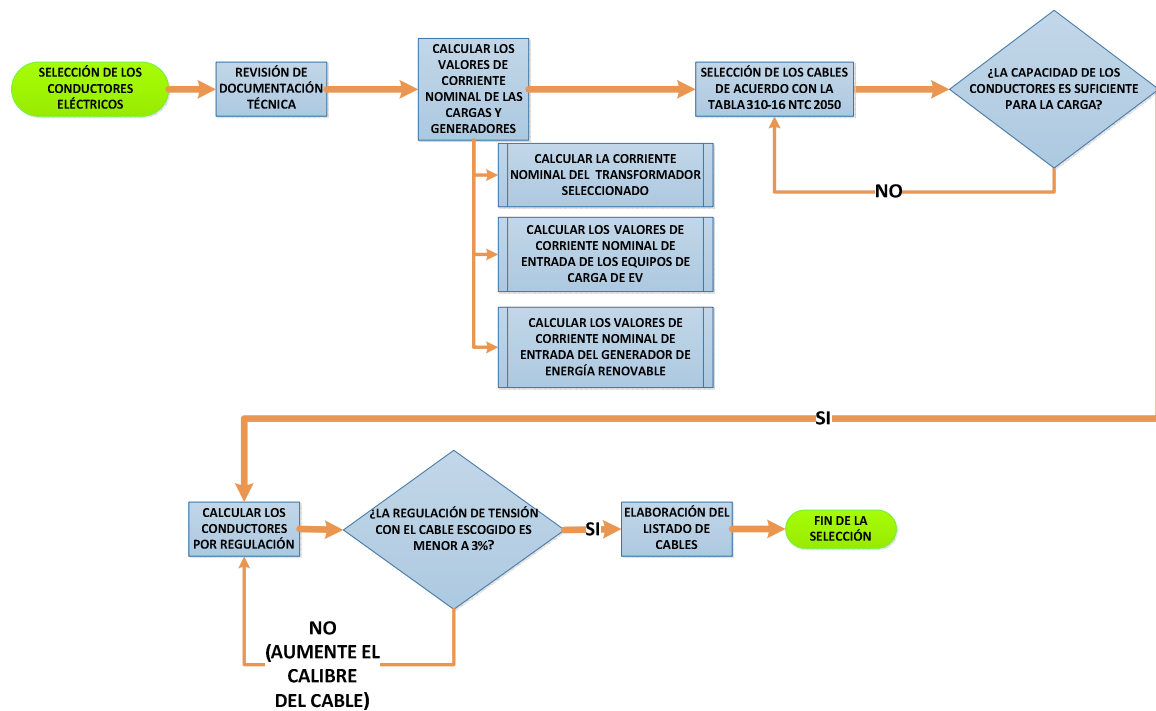


Figura 10. Flujograma para la Selección del Transformador. Producción propia.

El proceso de selección de los conductores en canalizaciones subterráneas tiene como resultado que los conductores tienen las siguientes premisas:

- Se tendrá en cuenta la carga instalada por circuito, la capacidad por sobre carga y una regulación por caída de tensión del máxima del 3% para cargas finales y 5% para acometidas tipo alimentador.
- Para el cálculo de la regulación de las cargas, se toma la distancia más larga que pueda presentarse dentro de la Estación de Recarga Rápida.
- El aislamiento mínimo será THHN/THWN-2 CT GR II para cables de baja tensión, temperatura de operación: 90°C, temperatura de corto circuito 250°C.
- Los cables de fuerza para baja tensión deberán ser monoplares para los calibres 2 AWG y superiores; y multiconductores (tripolares o tetrapolares) para los calibres 4 AWG e inferiores. El calibre mínimo para circuitos de fuerza deberá ser de 12 AWG.

El desarrollo de los cálculos de la Selección de los Conductores Eléctricos se pueden observar en la sección de anexos, en el ítem A.1.2. Cálculos de los Conductores Eléctricos.

Tabla 9. Memoria de resultados del cálculo de Intensidades de corriente. Producción propia.

Ítem	TAG	Descripción	F. P	Tensión de opera.	Corriente a plena carga ajustada a 480V	Poten Aparen	Poten activa
				(VAC)	(A)	(KVA)	(KW)
1.0	TR-TBTEVSE-001	Transformador-tablero 480VAC EVSE	0,85	480	180,42	150,00	127,50
2.0	TBTEVSE-PVGEN-001	Tablero 480VAC EVSE - GENERACIÓN CELDAS	0,85	480	180,42	150,00	127,50
3.0	TBTEVSE-001 - EVSE-001(002)	Tablero 480VAC EVSE - EVSE 1	0,95	480	63,31	52,63	50,00

La tabla 10 presenta las caídas de tensión para los cables valorados los cuales no superan el 3% como se estableció en las premisas de diseño y de acuerdo con la norma NTC 2050.

Tabla 10. Memoria de resultados del Cálculo de los Conductores por Regulación de Tensión. Producción propia.

CÁLCULO DE CONDUCTOR POR REGULACIÓN							Conductor Selecc.
Ítem	TAG	Descripción	Z eficaz por 1000m para $f_p=0.85$ de la tabla 9 del NEC	Long. de circuito	Constante de regulación del conductor	Caída de tensión	
				(m)		%	AWG
1.0	TR-TBTEVSE-001	Transformador-tablero 480VAC EVSE	3,61000E-01	30,00	1,56684E-04	0,71	2/0
2.0	TBTEVSE-PVGEN-001	Tablero 480VAC EVSE - GENERACIÓN CELDAS	3,61000E-01	30,00	1,56684E-04	0,71	2/0
3.0	TBTEVSE-001 - EVSE-001(002)	Tablero 480VAC EVSE - EVSE 1	6,56000E-01	40,00	2,84722E-04	0,60	2

Para la selección de las Barras del Tablero de Distribución en Baja Tensión se calcula la corriente del sistema nominal para la corriente total del sistema suministrada por el generador más la alimentación del transformador desde sus bornes secundarios. Se sigue el mismo proceso descrito anteriormente sin tomar en cuenta el cálculo de regulación y utilizando la norma NTC 2050 y DIN 43671 para la escogencia de las dimensiones de las barras conductoras.

La corriente a plena carga del sistema en baja tensión es 360,84 A de acuerdo con la suma de las intensidades del generador y la alimentación por el secundario del transformador al tablero general de distribución (ver la tabla 9) y se selecciona las barras en cobre 99% puro Pintadas una por fase, neutro y tierra. La corriente de la capacidad de las barras seleccionadas tiene una capacidad de 385 A cada una, con lo cual se asegura que tenga la suficiente robustez para admitir la corriente del generador de energía renovable más la alimentación desde el transformador de potencia en forma simultánea (ver la tabla 11).

Tabla 11. Memoria de resultados del Cálculo de las Barras del Tablero General de Distribución.
Producción propia.

Ítem	Descripción	Dimensiones de sección transversal	Capacidad de Corriente C.A.	Sección mm2
		mm	(A)	mm2
1.0	BARRA DE FASES	25X5	385	125
2.0	BARRA DE NEUTRO	25X5	385	125
3.0	BARRA DE TIERRA	25X5	385	125

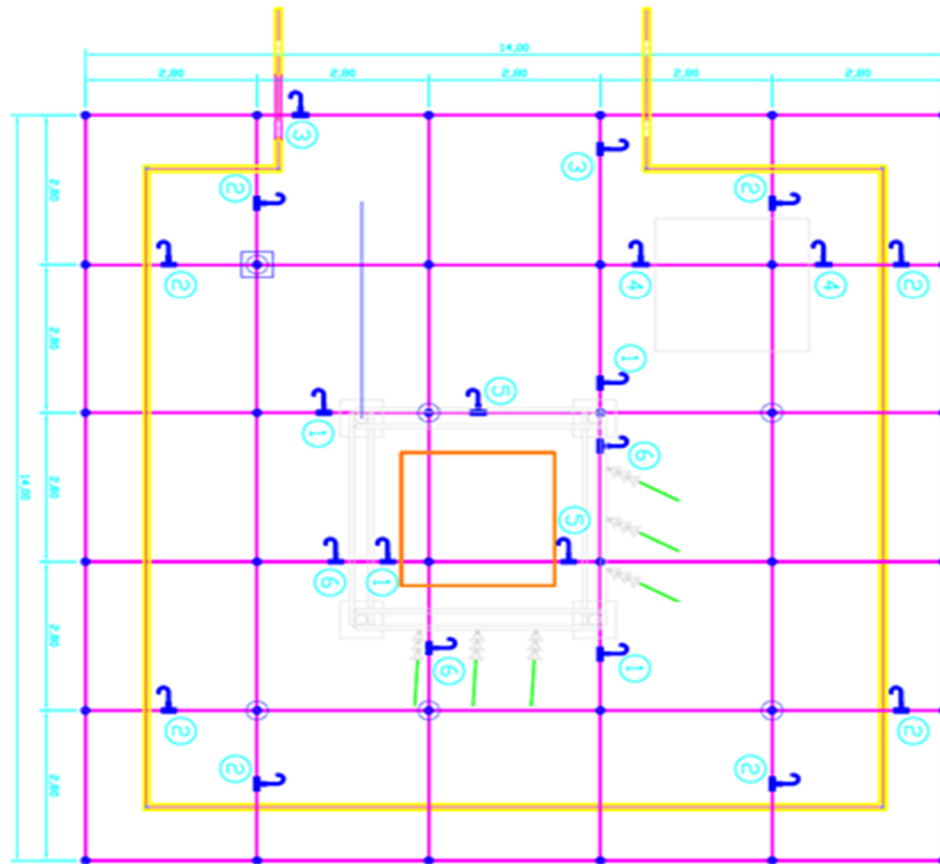
- **Cálculos de la Malla a Tierra del Tablero General de Distribución**

Para la metodología del cálculo de la malla a tierra para el tablero general de distribución se sigue la norma IEEE 80 [68]. La malla se presenta en una vista de planta en la figura 11 y los resultados en la tabla 12.

Tabla 12. Datos base para las colas de la malla de puesta a tierra. Producción Propia.

Cola	Descripción	Longitud	Calibre
		m	(A)
1	Conexión a bajante de apantallamiento	48	2/0
2	Conexión a Malla de cerramiento	2	2/0
3	Conexión a puerta de acceso	2	2/0
4	Conexión a Tablero General de Distribución	2	1/0
5	Conexión desde el transformador de potencia	30	2/0
6	Conexión a Tierra de pararrayos	36	2/0

Figura 11. Vista de planta de la malla de puesta a tierra de la subestación eléctrica y el tablero general de distribución. Producción propia.



El desarrollo de los cálculos de la Selección de la Malla de Puesta a Tierra se pueden observar en la sección de anexos, en el ítem A.1.2.6.Cálculo de la Malla de Puesta a Tierra para el Tablero General de Distribución.

Capítulo III: Análisis de la Simulación de la Estación de Carga Rápida

3.1. Desarrollo de la Simulación de la Estación de Recarga Rápida

Los desarrollos de la simulación de la estación de Recarga Rápida se realizaron en el software de análisis de sistemas de potencia: NEPLAN V556 [58]. Esta herramienta es útil para analizar, planear, optimizar y simular redes de manera eficiente con entornos modulares que permitirán presentar el caso de estudio desde varias perspectivas que permitan la evaluación de las capacidades de operación y desempeño de una estación de recarga rápida para EVS alimentada por la red eléctrica y soportada por generación renovable. La simulación de la Estación de Recarga Rápida para vehículos Eléctricos caracteriza las condiciones de operación a través de los tres análisis:

- Análisis de flujo de carga.
- Análisis de Corto circuito.
- Análisis de armónicos.

Para el Análisis de flujo de carga los métodos de cálculo que se utilizan son: Inyección de corrientes, Newton Raphson, Newton Raphson Extendido, Caída de Tensión eléctrica (por fase) y flujo de carga DC. Para el análisis de corto circuito la metodología que se utiliza es soportada en la norma IEC 60909, ANSI/IEEE C37.10/C37.13. Para el análisis de armónicos se calculan las corrientes y tensiones eléctricas en frecuencias de interés y en los elementos del sistema principales, también se calculan los valores r.m.s. para armónicos de tensión y corriente, el factor de distorsión armónica total (DIN/IEC) y el factor de acuerdo a IEEE. Se realiza la presentación de los resultados sobre el diagrama unifilar del sistema y se realiza la suma de armónicos según la norma IEC 1000-2-6. La figura 9 presenta un diagrama unifilar simplificado del sistema eléctrico de la estación de recarga rápida para EVs, el cual consta de dos puntos de EVSE, un sistema de generación de energía con fuente renovable fundamentado en generación fotovoltaica y una alimentación principal a través de la conexión al sistema eléctrico de distribución local recreando las condiciones del sistema de distribución de la ciudad de Bogotá. El diagrama unifilar de la figura 9 se presenta con los valores de los equipos EVSE con potencia de 50 kW, sin embargo, el actual estudio se corrió en simulaciones para las potencias de: 20 kW, 50 kW, 100 kW y 240 kW. Estos valores de potencia fueron escogidos teniendo en cuenta los límites del intervalo de potencias presentado en la norma SAE para los valores 20 kW y 240 kW [21] (límite inferior y

SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

CC-01
SECCIONADOR TRIPOLAR,
SIN CARGA
AISLADO A 15 kV

PARARRAYOS
15 kV
10 kA, ZnO

PR-001

CC-02
3X12 A

T1
150kVA
13,200VAC/480VAC

TABLERO GENERAL DE DISTRIBUCIÓN

CC-03
3X500 A
3N°2/0
AWG THHN
#3"

60Hz 300 kVA 480V 3Ø I=385A Icc=27 kA

CC-06
3X175 A

CC-05
3X500 A

CC-04
3X175 A

3N°2
AWG THHN
#3"

3N°2/0
AWG THHN
#3"

3N°2
AWG THHN
#3"

SURTIDOR EVSE
2
50KW

TABLERO SISTEMA
DE GENERACIÓN
RENOVABLE CON
CÉLULAS SOLARES

SURTIDOR EVSE
1
50KW

Los surtidores de EVSE 1 y 2 en la figura 12 se simulan con los perfiles de las cargas de los bancos de baterías de los EVs atendidos por los EVSE. Los diferentes modelos de vehículos eléctricos tienen curvas de cargas

características que permiten realizar el flujo de carga para la estación de recarga rápida donde se obtenga un pronóstico o una secuencia de cálculos de flujo de carga que se simula en el tiempo, con ayuda del módulo de Flujo de Carga con Perfiles de Carga del software NEPLAN V556 [58]. El componente de generación distribuida de NEPLAN modela el sistema de generación fotovoltaica y un banco de baterías de acuerdo a los informado por el fabricante con lo que se simularon los diferentes casos con el módulo de Generación distribuida con generación fotovoltaica y un banco de baterías de las potencias presentadas en las figuras donde se presentaron los diferentes escenarios y casos.

Los perfiles de carga o curvas de cargas son suministrados por algunos fabricantes de vehículos eléctricos [79] como datos de potencia activa y reactiva, tales como los presentados en las figuras 3 y 4, los cuales son asignados antes de cada corrida de flujo de carga en el Software NEPLAN.

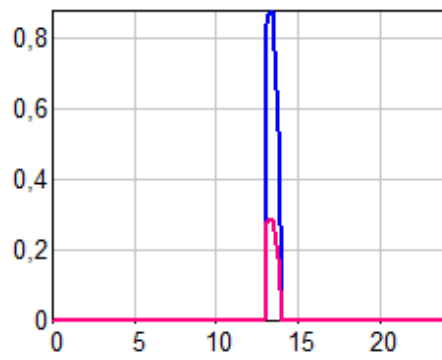


Figura 13. Curva de carga rápida en corriente continua Volkswagen e-Golf 26 kW incluida en la simulación en NEPLAN para el Flujo de Perfiles de carga [79]. Producción propia.

La figura 13 presenta la curva de carga rápida en C.C. para el EV de 26 kW Volkswagen e-Golf que se utilizó como parte de la simulación en el módulo de flujo de perfiles de carga para modelar el comportamiento eléctrico en el flujo de carga de los EVSE dentro del sistema de la Estación de recarga rápida para EVs. A continuación se presentará los resultados de las diferentes corridas realizadas con las diferentes potencias de análisis.

3.1.1. Análisis de Flujo de Perfiles de Carga para la Estación de Recarga Rápida para EVs

Dentro de las simulaciones corridas se presentaron cuatro (4) casos donde se consideran las siguientes potencias de: 20 kW, 50 kW, 100 kW y 240 kW.

Análisis de flujo de Perfiles de Carga para EVSE 20kW

El análisis de flujo de perfiles de carga para una estación de recarga rápida con la configuración cuya subestación tiene un transformador de 75 kVA y la potencia para dos EVSE es de 20 kW para cada uno, que alimenta un EV Volkswagen e-Golf 26 kW se encuentra que el perfil de la tensión para el surtidor 1 se presenta en la figura 14. Para este vehículo eléctrico el tiempo estimado de carga es de 45 minutos de acuerdo con lo formulado por el fabricante [79].

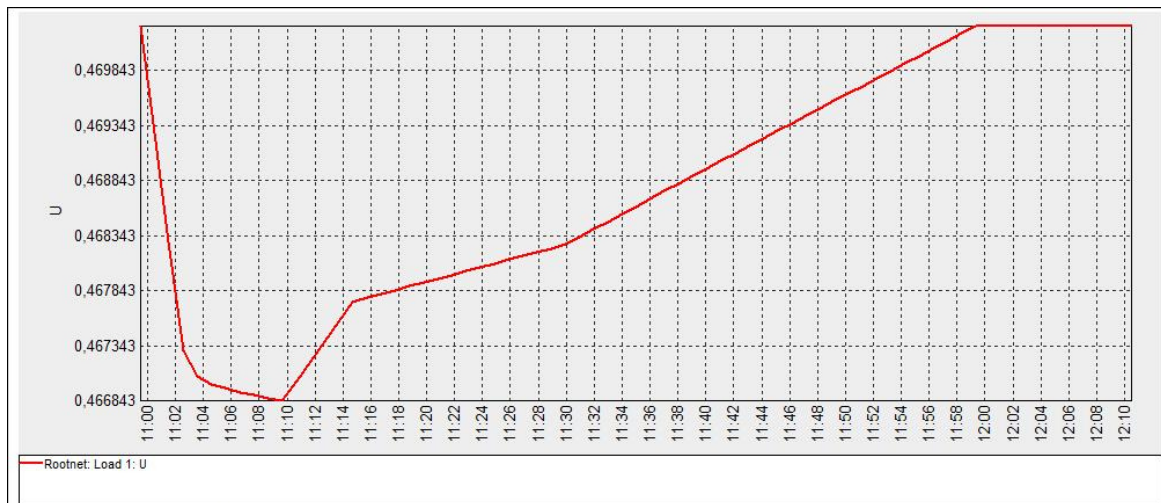


Figura 14. Curva de tensión en EVSE-1 de 20 kW para una carga de un EV Volkswagen e-Golf 26 kW. Producción propia.

Para la misma configuración de subestación tiene un transformador de 75 kVA y la potencia para dos EVSE es de 20 kW para cada uno, presenta el perfil de la corriente para el surtidor 1 se presenta en la figura 15.

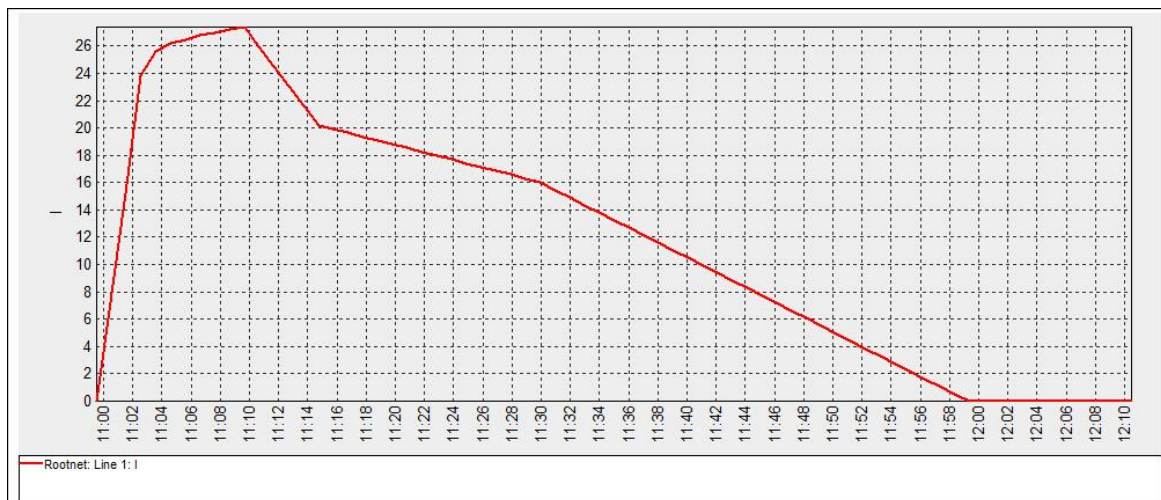


Figura 15. Curva de corriente en EVSE-1 de 20 kW para una carga de un EV Volkswagen e-Golf 26 kW. Producción propia.

La curva de los perfiles de las potencias activa y reactiva se presentan en la figura 16 para el surtidor 1.

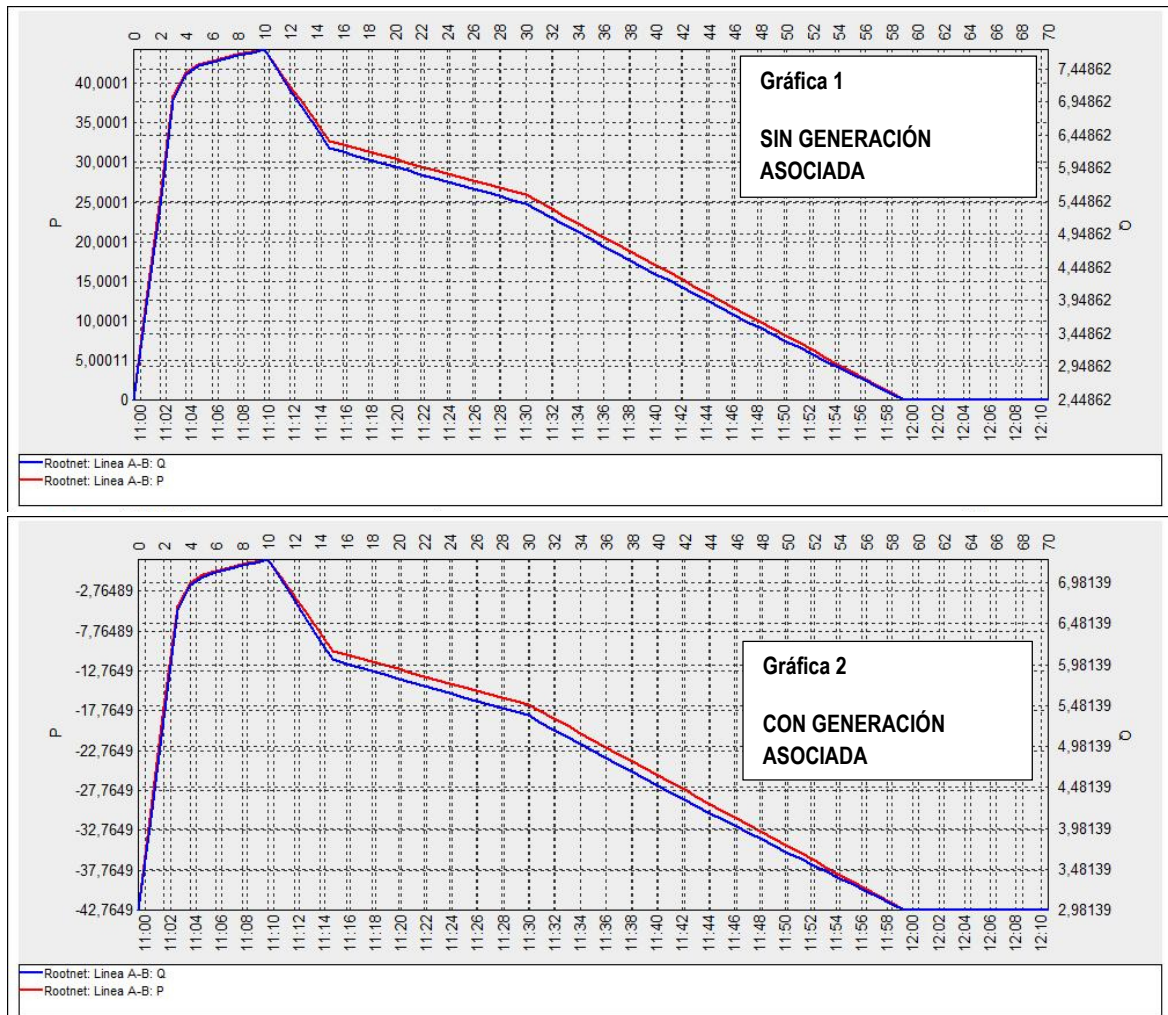


Figura 16. Curva de los perfiles de Potencia Activa y Reactiva en el Transformador de 75 kVA en la alimentación por baja al tablero general donde se conectan las cargas (EVSE) y la generación. Producción propia.

La curva de los perfiles de las potencias activa y reactiva se presentan en la figura 16 para el aguas abajo del transformador de 75 kVA que alimenta la barra donde se conecta los dos EVSE de la estación de recarga rápida con dos gráficas donde la gráfica 1 muestra el sistema de la estación de recarga rápida sin la generación asociada. Por otro lado, la gráfica 2 muestra la estación de recarga rápida con la generación asociada conectada e inyectando potencia al sistema a través de la barra del tablero general.

Se evidencia en la comparación de las dos gráficas que cuando la generación asociada al sistema se encuentra funcionando la curva de flujo de potencia se aplanan en la proporción de la carga es asumida por la generación. De lo anterior se infiere que la generación asociada puede contribuir en el aplanamiento de la curva de demanda de la estación de recarga rápida lo que permite que la presión sobre la red eléctrica convencional sea menor, con la consecuente independencia energética del sistema de la estación recarga rápida ante salidas de línea del sistema eléctrico convencional y la reducción de costos por pagos en los consumos de energía. Por otro lado, la generación renovable asociada a la estación de recarga rápida contribuye a la reducción de emisiones de CO₂.

Análisis de flujo de Perfiles de Carga para EVSE 50kW

El análisis de flujo de perfiles de carga para una estación de recarga rápida con la configuración cuya subestación tiene un transformador de 150 kVA y la potencia para dos EVSE es de 50 kW para cada uno, que alimenta un EV Volkswagen e-Golf 26 kW se encuentra que el perfil de la tensión para el surtidor 1 se presenta en la figura 17. Para este vehículo eléctrico el tiempo estimado de carga es de 45 minutos de acuerdo con lo formulado por el fabricante [79].

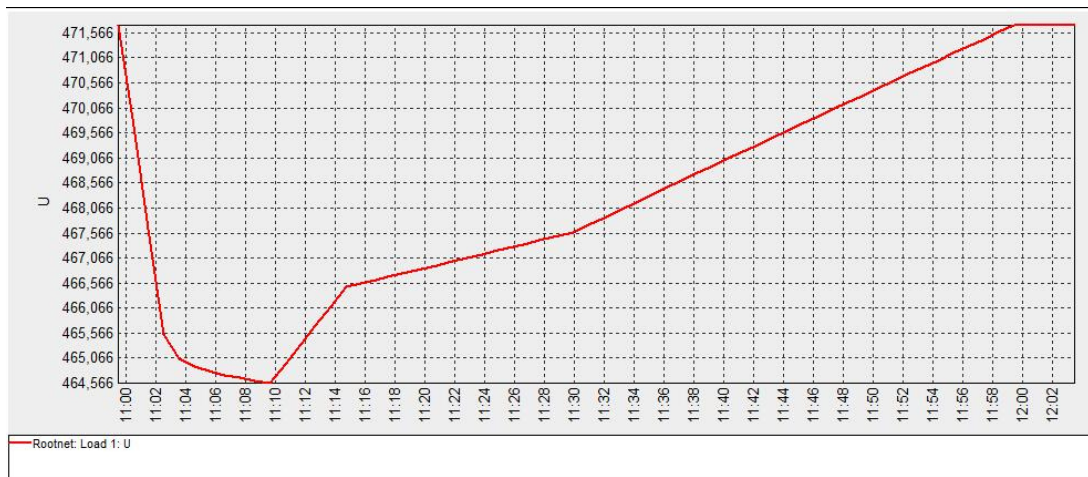


Figura 17. Curva de tensión en EVSE 1 para una carga de un EV Volkswagen e-Golf 26 kW. Producción propia.

Para la misma configuración de subestación tiene un transformador de 150 kVA y la potencia para dos EVSE es de 50 kW para cada uno, presenta el perfil de la corriente para el surtidor 1 se presenta en la figura 18.

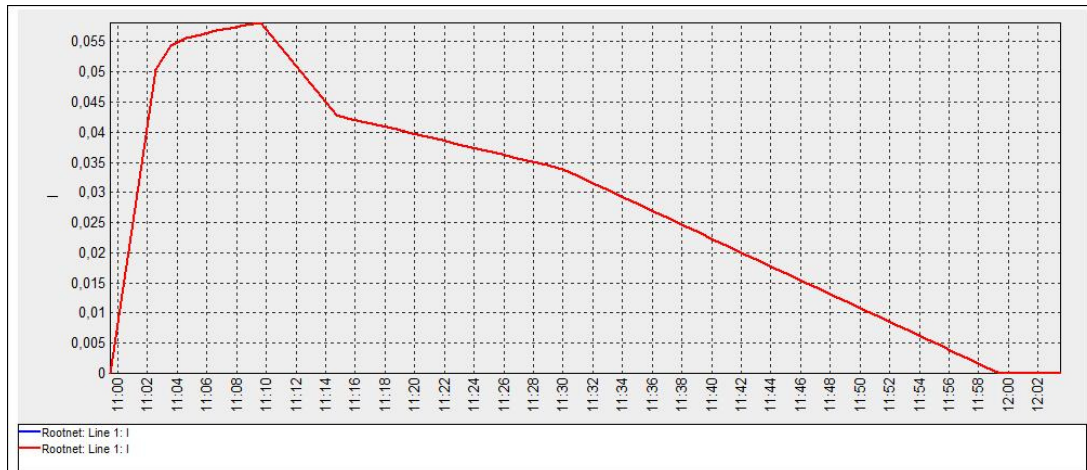


Figura 18. Curva de corriente en EVSE 1 para una carga de un EV Volkswagen e-Golf 26 kW. Producción propia.

La curva de los perfiles de las potencias activa y reactiva se presentan en la figura 19 para el surtidor 1, donde la generación renovable asociada al sistema de la Estación de Recarga Rápida se encuentra apagado.

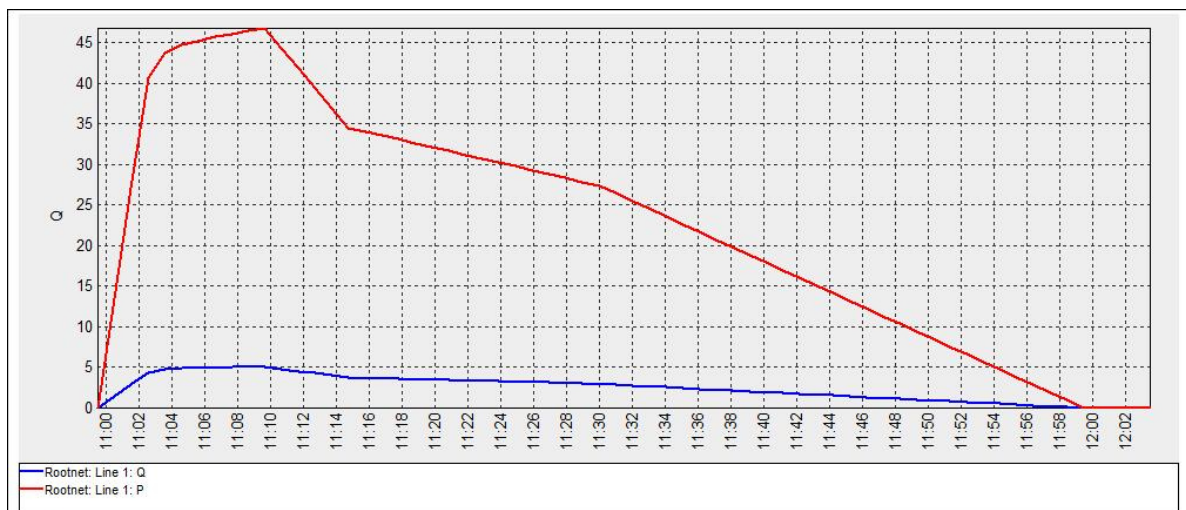


Figura 19. Curva de los perfiles de Potencia Activa y Reactiva en el EVSE 1 para una carga de un EV Volkswagen e-Golf 26 kW. Producción propia.

La curva de los perfiles de las potencias activa y reactiva se presentan en la figura 20 para el aguas abajo del transformador de 150 kVA que alimenta la barra donde se conectan los dos EVSE de la estación de recarga rápida con dos gráficas donde la gráfica 1 muestra el sistema de la estación de recarga rápida sin la generación asociada. Por otro lado, la gráfica 2 muestra la estación de recarga rápida con la generación asociada conectada e inyectando potencia al sistema a través de la barra del tablero general.

Nuevamente, se evidencia en la comparación de las dos gráficas que cuando la generación asociada al sistema se encuentra funcionando la curva de flujo de potencia se aplanan en la proporción de la carga es asumida por la generación que contribuye en el aplanamiento de la curva de demanda de la estación de recarga rápida permitiendo que la presión sobre la red eléctrica convencional sea menor.

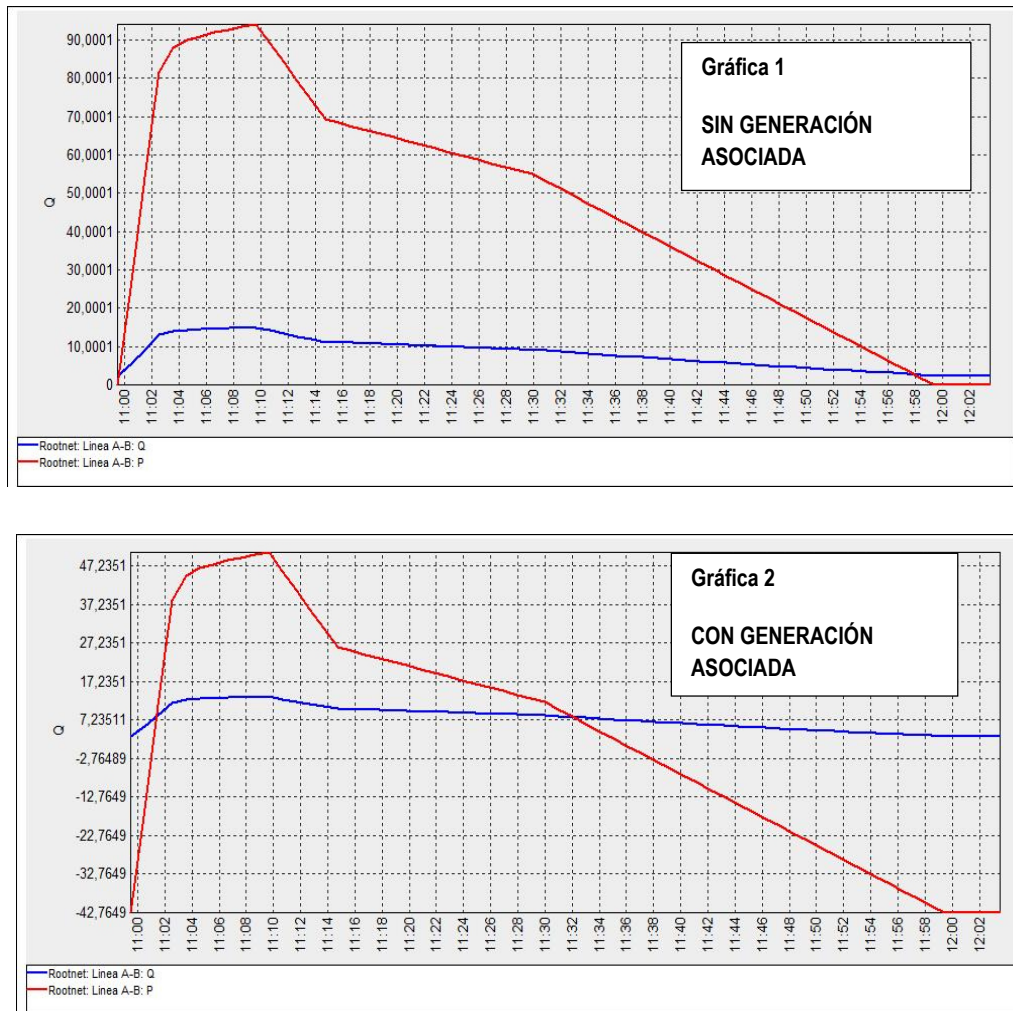


Figura 20. Curva de los perfiles de Potencia Activa y Reactiva en el Transformador de 150 kVA en la alimentación por baja al tablero general donde se conectan las cargas (EVSE) y la generación. Producción propia.

Análisis de flujo de Perfiles de Carga para EVSE 240kW

En este caso el análisis de flujo de perfiles de carga para una estación de recarga rápida con la configuración cuya subestación tiene un transformador de 600 kVA y la potencia para dos EVSE es de 240 kW para cada uno, que alimenta un EV Volkswagen e-Golf 26 kW se encuentra que el perfil de la potencia consumida para

el surtidor 1 se presenta en la figura 21 y se observa que la curva de demanda de potencia consumida en la recarga del vehículo puede ser aplanada por la entrada de un generador.

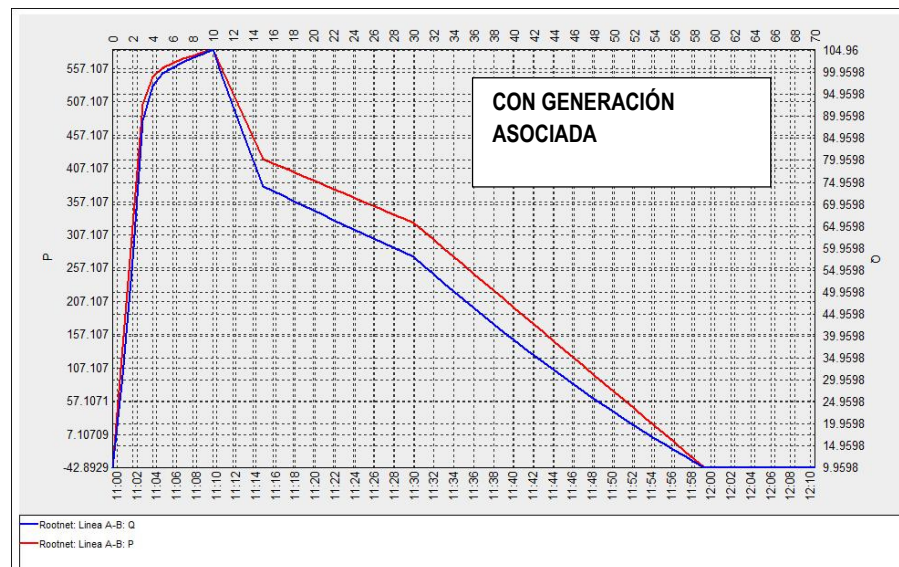


Figura 21. Curva de los perfiles de Potencia Activa y Reactiva en el Transformador de 600 kVA en la alimentación por baja al tablero general donde se conectan las cargas (EVSE) y la generación. Producción propia.

En la gráfica se observa como parte de la potencia del transformador puede ser asumida por la generación en este caso en 42.89 KVA que corresponde a la potencia entregada por el generador asociado al sistema.

Parte del éxito de una generación distribuida asociada a la estación de recarga se centra en el dimensionamiento óptimo de sus componentes para lograr que se realice en mayor aprovechamiento de la generación y al plantearse el uso de generación renovable se precisa tener en cuenta los limitantes de la zona para radiación solar cuando se diseñe un sistema fotovoltaico. El presente trabajo no incluye el diseño de un sistema de generación renovable o su optimización.

3.1.2. Análisis de Flujo de Carga para la Estación de Recarga Rápida para EVs

En el presente ítem se encuentran los resultados de la simulación del análisis de flujo de carga para el proyecto de la Estación de Recarga Rápida para vehículos eléctricos conectados como cargas en el sistema de la estación de recarga soportada en el software NEPLAN con el fin de determinar los niveles de tensión en los nodos y/o barrajes y las transferencias de potencia activa y reactiva por las líneas, los alimentadores y por los transformadores de potencia asociados al sistema eléctrico en estado estable.

El análisis de flujo de carga centra su importancia para el presente proyecto en la determinación de las condiciones de operación del sistema eléctrico. La información que se obtiene del flujo de carga es la magnitud y el ángulo de fase para los niveles de tensión en cada barra, para las potencias activas y reactivas que fluyen en cada línea en estado estable de operación.

Los niveles de tensión deben ser los adecuados para la operación normal de los EVSE por tanto es necesario considerar las caídas de tensión eléctrica bajo condiciones normales de carga para el sistema balanceado y en operación en estado estable. El análisis de flujo de potencia establece la adecuada selección de los calibres de los conductores, la regulación de tensión, la carga conectada y la potencia inyectada al sistema específicamente a los barrajes en estudio, y la cargabilidad del equipo eléctrico [64] - [66]. El método utilizado para realizar el análisis de flujo de carga es de Inyección de Corrientes que admite pocos generadores PV, se realiza un balance de carga, y es adecuado para las redes de distribución [58].

Para la evaluación de la cargabilidad y las tensiones del sistema, se consideran los siguientes límites operativos:

- Carga máxima en transformadores, cables, generadores, barras: 100% de la capacidad nominal.
- Tensión mínima en buses y barras: 95% de la tensión nominal.
- Tensión máxima en buses y barras: 105% de la tensión nominal.

Las siguientes son las consideraciones para los escenarios que se modelaron para el sistema eléctrico de estudio:

- Se considera que la Estación de Recarga Rápida para EVs recibe energía eléctrica a través de un circuito de alimentación desde el Sistema Eléctrico de Distribución a una tensión de 13.200 voltios que alimenta a un transformador Principal eléctrico de distribución dedicado al suministro de la Estación con una conexión Dyn5 e impedancia típica de acurdo con al tabla 8 de acuerdo a las especificaciones técnicas de la empresa local de distribución de energía [22].
- Se considera que las diferentes capacidades para el transformador principal (ver tabla 8) se encuentra en la subestación eléctrica de distribución dedicada a la alimentación de la Estación de Recarga Rápida para EV con una tensión de 480 voltios en el secundario y un intercambiador manual sin carga de acuerdo a la especificación requerida por la empresa local de distribución de energía [22].
- Se considera que la Generación Distribuida con celdas fotovoltaicas no opera en paralelo con la alimentación a través de la Red Eléctrica de Distribución Local de acuerdo a los escenarios que se plantean.

- Se considera que las cargas operan de forma continua de acuerdo a los diferentes escenarios que se plantean.
- Se considera que en ninguno de los barrajes se conectaron equipos de corrección de factor de potencia.
- Se considera en el presente análisis como “VALOR CRÍTICO” cuando el nivel de tensión cae a un valor por debajo del 95% de su tensión nominal.
- En todos los alimentadores de baja tensión (480 V) fueron considerados conductores con aislamiento tipo THWN-2 para 90°C tendidos en canalizaciones subterráneas.
- En la alimentación de media tensión (13.200 V) se consideraron cables monopolares con aislamiento de 15 kV 100% para el transformador Principal el cual tiene las potencias descritas en la tabla 8 para los cuatro casos de potencias de EVSE con temperatura de 90°C.

- **Escenarios de Operación Relevantes**

Para este estudio se realizaron los análisis de flujos de carga considerando que la Estación de Recarga Rápida para EVs tiene una sola alimentación a través de la red de distribución local a 13.2 kV con las condiciones normales de operación, y una alimentación de respaldo para la Estación en condiciones anormales de operación soportada con generación renovable asociada que consiste en generación fotovoltaica conectada al tablero general de distribución y generando a 480V. Las condiciones anormales se presentan cuando la alimentación por la red de distribución de energía eléctrica local no está disponible. La alimentación de respaldo con generación de energía renovable también se puede utilizar en condiciones normales de operación en conjunto con la alimentación de la red de distribución local a 13.2 kV.

De acuerdo con la topología de alimentación descrita se evaluaron los siguientes escenarios de operación del sistema eléctrico de la Estación de Recarga Rápida para vehículos eléctricos. En la tabla 13 la casilla que contiene “X” significa que el interruptor correspondiente está cerrado y el equipo se encuentra en operación.

Tabla 13. Escenarios de operación del sistema, Producción Propia.

ÍTEM	INTERRUPTOR	ESCENARIOS		
		1	2	3
1	CC-01	X		X
2	CC-02	X		X
3	CC-03	X		X
4	CC-04	X	X	X
5	CC-05	X	X	
6	CC-06	X	X	X

7	CC-07	X	X	X
8	CC-08	X	X	X
SUBESTACIÓN ELÉCTRICA				
9	TRANSFORMADOR PRINCIPAL	X		X
SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE				
10	CELDA FOTOVOLTAICAS	X	X	
CARGAS				
11	LOAD 1: SURTIDOR EVSE 1	X	X	X
12	LOAD 2: SURTIDOR EVSE 2	X	X	X

Escenario 1

El sistema eléctrico opera en condiciones normales y el alimentador que suministra potencia eléctrica de manera independiente y dedicada al transformador Principal a 13.2 kV, este entrega potencia a las cargas conectadas al barraje del Tablero de Distribución General de la Estación de Recarga Rápida las cuales son los puntos de carga rápida, igualmente hay una contribución de energía de la generación asociado con energía renovable al sistema de estudio.

Diagrama de Flujo para EVSE de carga 20 kW

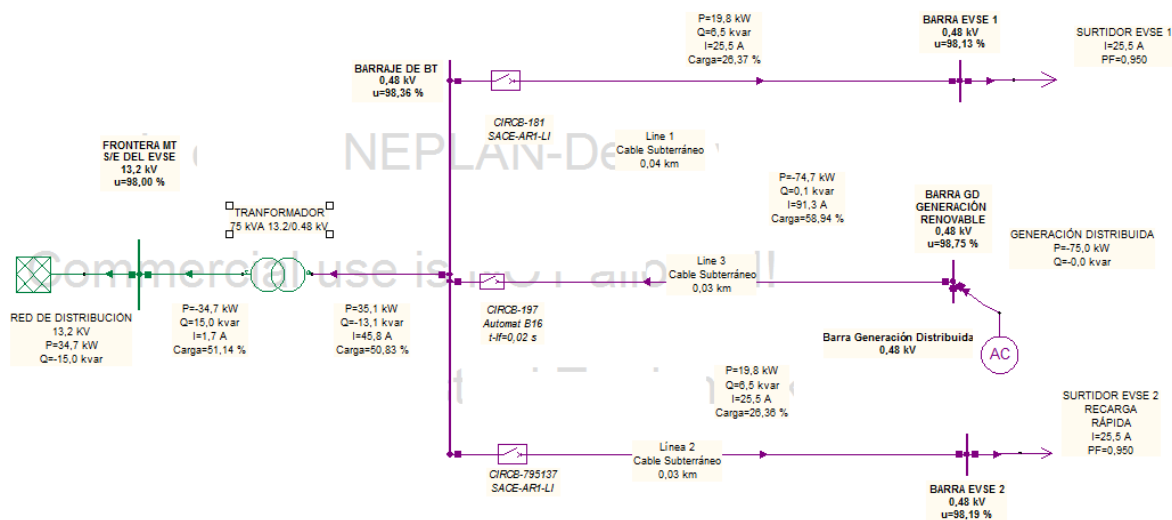


Figura 22. Escenario 1: Operación normal, las cargas de la Estación de Recarga Rápida para EV Caso de EVSE de potencia 20 kw. Producción propia.

La figura 22 muestra un flujo de potencia que se entrega a la red local teniendo en cuenta que la generación distribuida renovable presenta la misma potencia del transformador principal de la subestación eléctrica de la Estación de recarga rápida, esto se observa por la dirección de las flechas de flujo en la figura 22. La generación supera el consumo de los dos surtidores dado que se dimensiona en la potencia de 75 kVA una holgura para una posible expansión en sistemas auxiliares tales como iluminación y tomacorrientes. No se encuentran sistemas en sobrecarga de acuerdo el gráfico arrojado por el software.

Diagrama de Flujo para EVSE de carga 50 kW

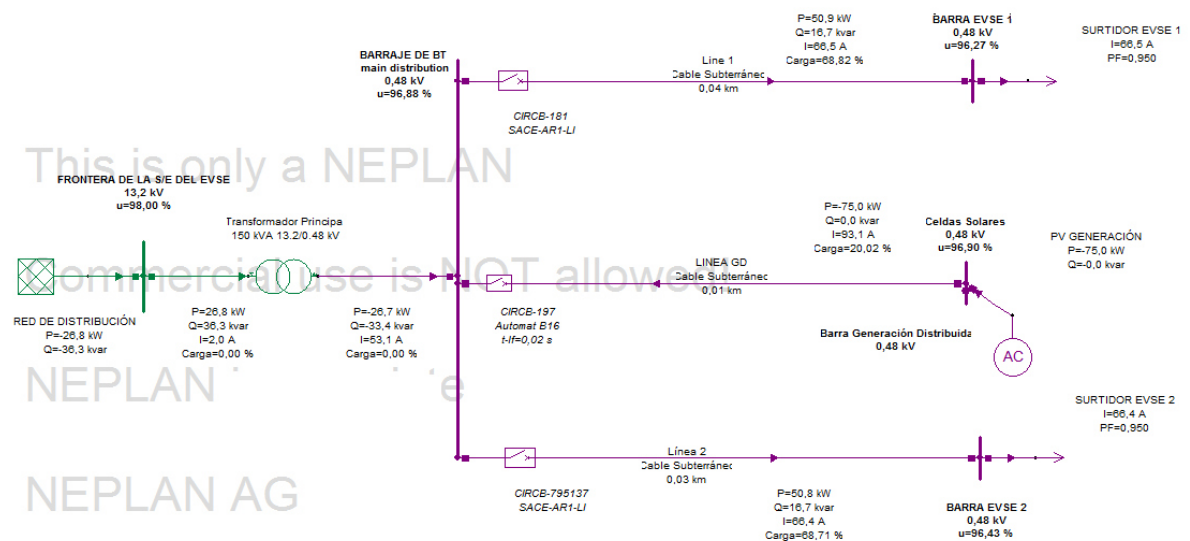


Figura 23. Escenario 1: Operación normal, las cargas de la Estación de Recarga Rápida para EV Caso de EVSE de potencia 50 kW. Producción propia.

La figura 23 muestra un flujo de potencia que fluye desde la red local a través del transformador principal a la carga y que se complementa por la generación renovable que la entrega en el barraje de 480 V del tablero principal, esto es porque la potencia generada permanece en 75 kVA con lo que no alcanza para asumir la carga completa de los dos EVSE que se conectan en la Estación de Recarga Rápida. La figura 23 no muestra elementos en sobrecarga.

Diagrama de Flujo para EVSE de carga 100 kW

La figura 24 muestra un flujo de potencia similar al caso anterior donde la potencia del EVSE es de 50 kW, es un flujo de potencia que viene desde la red local y se une con la generación renovable en el tablero principal

de 480V donde se conecta la carga. Sin elementos en sobrecarga el sistema eléctrico de la Estación de Recarga Rápida presenta un flujo de carga adecuado.

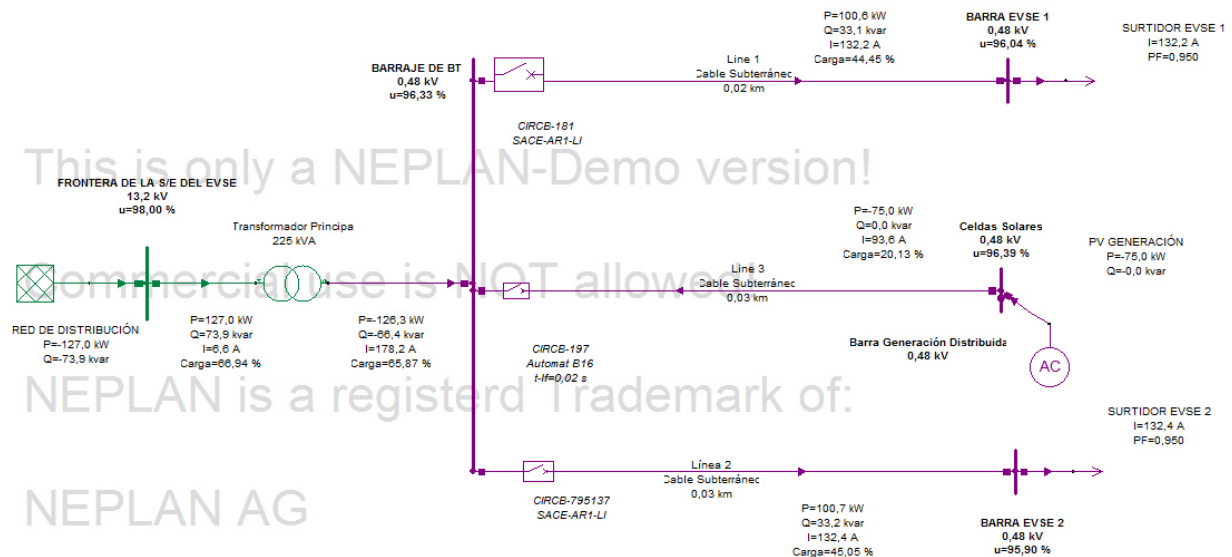


Figura 24. Escenario 1: Operación normal, las cargas de la Estación de Recarga Rápida para EV Caso de EVSE de potencia 100 kW. Producción propia.

Diagrama de Flujo para EVSE de carga 240 kW

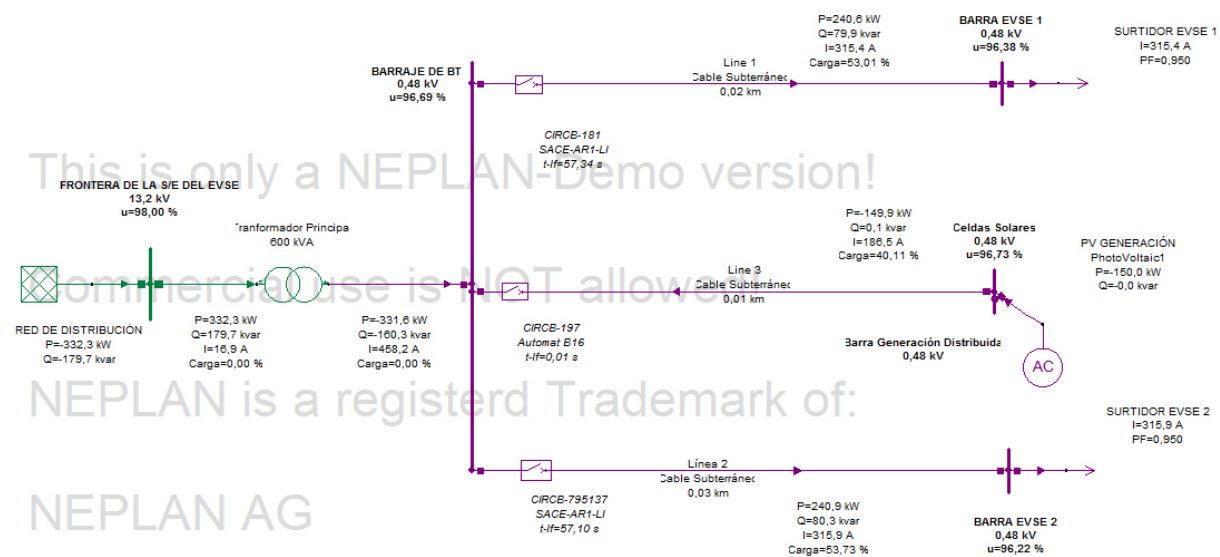


Figura 25. Escenario 1: Operación normal, las cargas de la Estación de Recarga Rápida para EV Caso de EVSE de potencia 240 kW. Producción propia.

La figura 25 muestra un flujo de potencia que viene desde la red local y se une con la generación renovable en el tablero principal de 480V donde se conecta la carga. En este caso la generación se varia a 150 kVA para observar los efectos sobre la carga y el sistema eléctrico de la estación de recarga rápida. Sin elementos en sobrecarga el sistema eléctrico de la Estación de Recarga Rápida presenta un flujo de carga adecuado.

Escenario 2

El sistema eléctrico opera en condiciones anormales con la contingencia que el alimentador que suministra potencia eléctrica de manera independiente y dedicada al transformador Principal con una tensión de 13.2 kV falla y sale de línea. Por tanto no entrega potencia a las cargas conectadas al barraje del Tablero de Distribución General de la Estación de Recarga Rápida las cuales son los puntos de carga rápida. La generación renovable asociada alimenta el sistema eléctrico a través del tablero de distribución general asumiendo el total de la carga, esto corresponde al escenario 2 de la tabla 13.

Diagrama de Flujo para EVSE de carga 20 kW

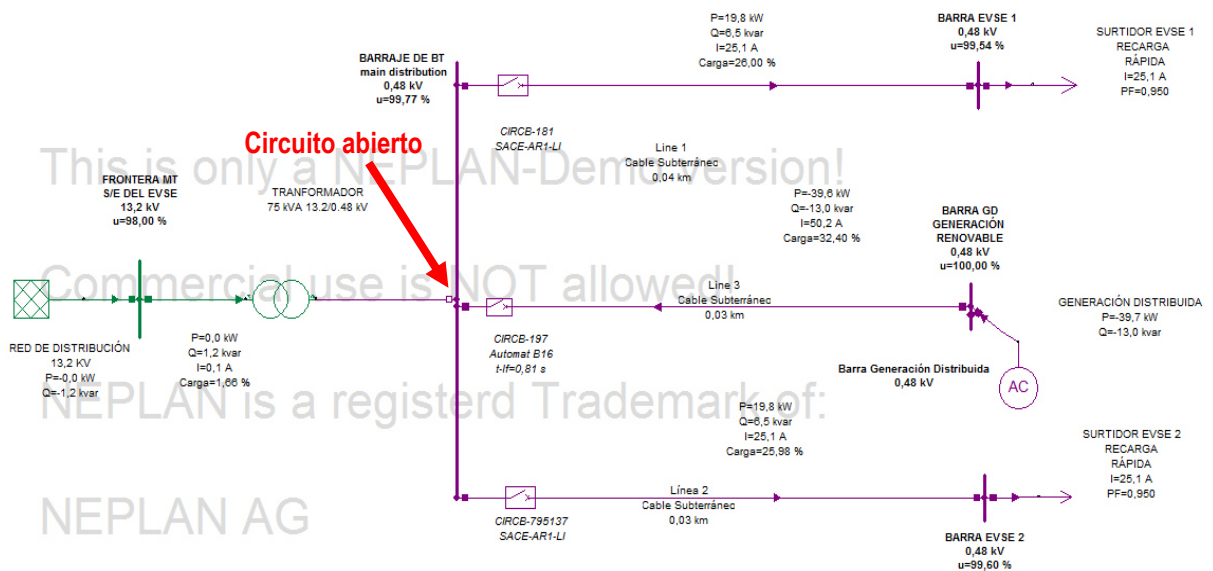


Figura 26. Escenario 2: Circuito abierto en la alimentación a la barra de 480V del transformador por baja tensión en la Estación de Recarga Rápida para EV Caso de EVSE de potencia 20 kW. Producción propia.

En este escenario la generación de 75 kVA se muestra con valores de carga de 39,7kw en potencia activa entregada a los EVSE 1 y 2 los cuales operan con una corriente más baja que la presentada en el escenario 1. El sistema eléctrico opera en condiciones anormales con la contingencia que el alimentador que suministra potencia eléctrica de manera independiente y dedicada al transformador Principal de 75 kVA con una tensión

de 13.2 kV falla y sale de línea. Por tanto, la red local no entrega potencia a las cargas conectadas al barraje del Tablero de Distribución General de la Estación de Recarga Rápida, entre tanto, la carga es asumida en su totalidad por la generación renovable la cual tiene la capacidad suficiente. Esta condición hace que los EVSE 1 y 2 operen normalmente dado que la Generación es capaz de generar lo requerido por la carga.

Para los casos en que la generación es menor que lo requerido por la carga, el sistema colapsa al salir la red eléctrica de distribución dado que la generación no es capaz de mantener la carga. Entonces, necesario que la generación esté acorde con las necesidades de la carga para que el sistema opere en este escenario de contingencia en los casos en que las potencia de los EVSE es de 50 kW, 100 kW y 240 kW.

Escenario 3

El sistema eléctrico opera en condiciones normales y el alimentador que suministra potencia eléctrica de manera independiente y dedicada al transformador Principal a 13.2 kV, este entrega potencia a las cargas conectadas al barraje del Tablero de Distribución General de la Estación de Recarga Rápida las cuales son los puntos de carga rápida. La generación renovable asociada permanece desconectada del sistema.

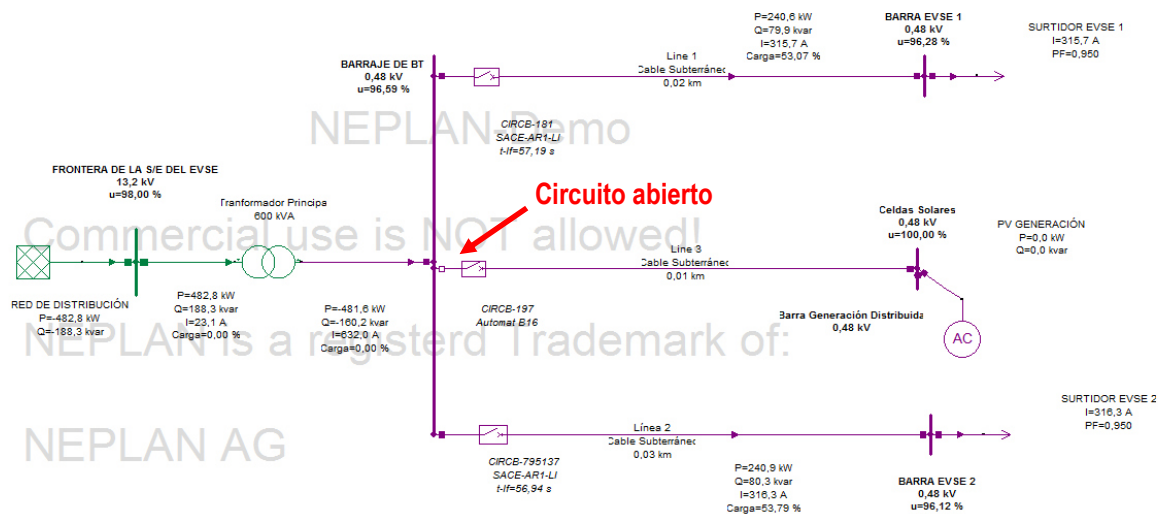


Figura 27. Escenario 3: Operación normal, las cargas de la Estación de Recarga Rápida para EV se alimenta solo desde el circuito de red local. Producción propia.

Para el escenario 3 en la figura 27 donde la generación renovable se encuentra fuera de línea la única fuente de suministro de energía es la red de distribución local que asume toda la carga que en este caso son los EVSE 1 y 2 de 240 kW cada uno. Se considera que esta operación es normal para el sistema aun con la generación fuera de línea. Para los demás casos donde las potencias de los EVSE es de 20 kW, 50, kW y 100 kW se encuentra que el sistema modelado opera de manera similar donde la carga es asumida por la Red de

distribución local. Para este escenario es claro que no se presenta un manejo de los picos de curva de carga debido a que la generación renovable asociada a la estación de recarga no está operando esto se muestra en la figura 20 y 21 en la sección 3.1.1. “Análisis de Flujo de Perfiles de Carga para la Estación de Recarga Rápida para EVs”.

- **Resultados del Análisis de Flujo para el caso de EVSE con potencia de 50 kW**

Como resumen de las simulaciones se presentan las siguientes tablas para cada escenario de operación para el caso de 50 kW se presenta a continuación:

- TABLA 14 muestra la capacidad de corriente de los principales barrajes para los escenarios
- TABLA 15 resumen de las tensiones y potencia en los principales barrajes.
- TABLA 16 muestra la transferencia de potencia a través de los transformadores principales y generador de energía renovable asociada.

En la tabla 14 se muestra la capacidad nominal de los barrajes y el comportamiento de corriente en los barrajes cuando se trabaja con cargas operativas en los diferentes escenarios. Se observa que no existen problemas de sobrecarga en las barras cuando hay flujo de carga con los valores de operación en todos los escenarios.

Tabla 14. Capacidad de corriente de los principales barrajes para los escenarios, Producción Propia.

ÍTEM	NOMBRE	ELEMENTO	TENSIÓN NOMINAL	CORRIENTE NOMINAL	ESCENARIO 1			ESCENARIO 2			ESCENARIO 3		
			Vn	In	I	Ángulo I	Cargabilidad	I	Ángulo I	Cargabilidad	I	Ángulo I	Cargabilidad
			V	A	A	°	%	A	°	%	A	°	%
1	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	Equivalente de Red	13200	6,6	3,1	148,1	46,97	0,1	90	1,52	4,9	159,2	74,24
2	BARRAJE DE BT	Línea B-B	480	185	85	149,8	0	0	0	0	134,3	160,4	0
3	Celdas Solares	Línea 3	480	155	53,1	-0,7	34,27	131,7	-18	84,98	0	0	0
4	Load 1	SURTIDOR EVSE 1	480	115	66,9	161,1	69,25	65,9	162	68,17	67,1	160,4	69,5
5	Load 2	SURTIDOR EVSE 2	480	115	66,9	161,1	69,25	65,9	162	68,17	67,1	160,4	69,5

La tabla 15 presenta los resultados del flujo de carga en el detalle de los valores de regulación de tensión en cada una de las barras del transformador de 150 kVA. Se obtiene la regulación de tensión adecuada y dentro de lo requerido siendo la caída de tensión menor al 5% en las cargas conectadas en los barrajes analizados.

Tabla 15. Resumen de las tensiones en los principales barrajes para la Estación de recarga rápida para EV, Producción Propia.

ÍTEM	NOMBRE	ELEMENTO	TENSIÓN NOMINAL	ESCENARIO 1		ESCENARIO 2		ESCENARIO 3	
			Vn	U	u	U	u	U	u
			V	v	%	v	%	v	%
1	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	Equivalente de Red	13200	12936	98	12936	98	12936	98
2	BARRAJE DE BT	Línea B-B	480	463,8	96,63	471	98,12	462,2	96,28
3	Celdas Solares	Línea 3	480	467,4	97,37	480	100	0	0
4	Load 1	SURTIDOR EVSE 1	480	459,2	95,67	466,5	97,18	457,6	95,32
5	Load 2	SURTIDOR EVSE 2	480	459,2	95,67	466,5	97,18	457,6	95,32

En la tabla 16 se presenta el comportamiento de la fuente de energía renovable asociada y en el transformador cuando estas trabajan con cargas de operación. No se presenta ningún tipo de sobrecarga en el transformador.

Tabla 16. Transferencia de potencia a través de los transformadores principales y generador de energía renovable asociada, producción propia.

ÍTEM	NOMBRE	ELEMENTO	Potencia Aparente Nominal	ESCENARIO 1				ESCENARIO 2				ESCENARIO 3			
				P	Q	S	Cargabilidad	P	Q	S	Cargabilidad	P	Q	S	Cargabilidad
				kVA	kw	kVAR	kVA	kw	kVAR	kVA	%	kw	kVAR	kVA	%
1	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	Equivalente de Red	150	59,8	37,2	70,43	47%	0	0	0,00	0	103,1	39,1	110,27	74%
2	BARRAJE DE BT	Línea B-B	150	102,8	37,2	109,32	73%	104,1	33,9	109,48	73%	103,1	39,1	110,27	74%
3	Celdas Solares	Línea 3	150	43	0	43,00	29%	104,1	33,9	109,48	73%	0	0	0	0%
4	Load 1	SURTIDOR EVSE 1	52,63	50,5	16,6	53,16	101%	50,5	16,6	53,16	101%	50,5	16,6	53,16	101%
5	Load 2	SURTIDOR EVSE 2	52,63	50,5	16,6	53,16	101%	50,5	16,6	53,16	101%	50,5	16,6	53,16	101%

En los escenarios 1 y 2 participa la generación renovable asociada al sistema entregando. Para el escenario 1 la situación que se observa es que la generación renovable está asumiendo el 41,83% de la carga del sistema lo que se traduce en que la Red eléctrica de distribución está aportando el 58,2% del total de la carga requerida por la Estación de Recarga rápida para EVs. Para el escenario 2 la generación renovable asume el total de la carga. La generación renovable asociada al sistema puede ser decisiva en la estrategia de mitigar el impacto negativo que pueda presentarse en la red de distribución ya que le quita presión a la red eléctrica al entregar parte o el total de la potencia necesaria a las cargas de la Estación de Recarga.

Igualmente, se puede anticipar que la generación renovable como principal proveedor de potencia al sistema eléctrico de la estación de recarga no solo liberará potencia de las redes de distribución sino también de posibles armónicos que generen los EVSE o el mismo sistema de generación renovable a través de sus componentes de electrónico de potencia.

3.2. Análisis de Cortocircuito para la Estación de Recarga Rápida para EVs

A continuación se presentan las simulaciones y resultados del análisis de cortocircuito realizado al sistema eléctrico de la Estación de recarga Rápida para EVs propuesto con el fin de determinar los niveles de corriente de cortocircuito en los nodos y barrajes asociados al sistema eléctrico en estudio en estado estable y así verificar el dimensionamiento de estos equipos y el cumplimiento con los niveles de corrientes de cortocircuitos en las condiciones que se observan en la redes eléctricas del sistema de distribución de la ciudad de Bogotá.

Un cortocircuito es detectable con la aproximación a cero de la impedancia de un circuito específico que conduce a un aumento de la corriente al no encontrar resistencia. El figura 28 se observa el diagrama de la Estación de recarga rápida para EVs que es objeto del análisis de cortocircuito.

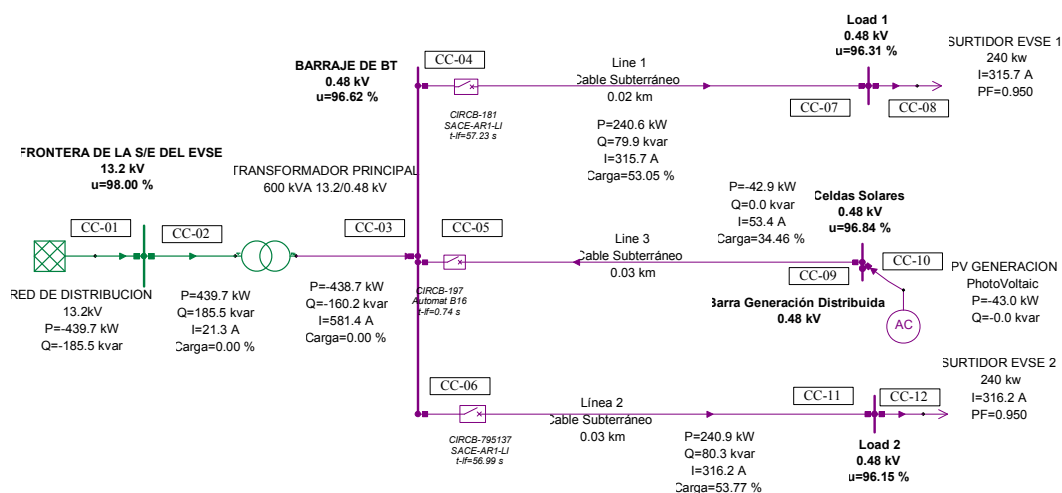


Figura 28. Diagrama unifilar Base para el análisis de cortocircuito para la Estación de Recarga vista del software NEPLAN para el caso de EVSE de 240 kW de potencia. Producción propia.

El análisis de cortocircuito se requiere para el diseño de sistemas de potencia para especificar las dimensiones de los barrajes de los equipos, igualmente la selección de los equipos y dispositivos que conforman la red eléctrica depende tanto de los parámetros en tensión y corriente en estado estable como los requerimientos de tensión y corriente durante estados transitorios en eventos de cortocircuito. El software NEPLAN para el análisis de corto circuito permite utilizar los métodos de: superposición y las normas ANSI e IEC. Para este análisis, el método utilizado está presentado en la norma IEC 60909 de 2015 [60] el cual se aplica a redes

eléctricas con una tensión de servicio que sea inferior a 230kV y utiliza una fuente activa única de tensión equivalente en el sitio de la falla en el sistema eléctrico.

La guía presentada en la norma técnica IEC 60909 del 2015 para calcular corrientes de falla mínimas y máximas, utiliza las corrientes de cortocircuito mínimas para la coordinación de los dispositivos de protección y las corrientes de falla máxima se comparan con los valores nominales de los interruptores. Esta metodología tiene su aplicabilidad en:

- Estudiar fallas comparadas con la interrupción o fenómenos de conmutación de los equipos.
- Verifica que los componentes del sistema de potencia soporten los esfuerzos térmicos originados de fallas de cortocircuito.
- Selección y ajuste de los dispositivos de protección eléctrica.
- Dimensiona los equipos del sistema de puesta a tierra y neutro.
- Presenta información base para el diseño de la malla de puesta a tierra de la subestación eléctrica del sistema eléctrico.
- Establece la base para la coordinación de protecciones eléctricas de sobrecorriente.

La simbología y la descripción de los valores de cortocircuito se presentan en la tabla 17.

Tabla 17. Descripción de las variables más comunes en el cálculo de corrientes de falla según la norma IEC 60909 2015. [60]

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	CONCEPTO
I''^k	Corriente inicial simétrica de cortocircuito.	Es el valor rms de la corriente simétrica de cortocircuito en el instante en que se produce el cortocircuito.
I_k	Corriente en estado estable De cortocircuito.	Es el valor rms de la corriente de cortocircuito en régimen permanente.
S_{kss}	Potencia inicial simétrica de cortocircuito.	Es el valor de la potencia asociada a la corriente inicial simétrica de cortocircuito.
I_p	Corriente pico de cortocircuito.	Es el máximo valor posible de la corriente simétrica de cortocircuito.
I_b	Corriente de corte de la protección.	Valor de la corriente de cortocircuito en el instante antes de que en la protección extinga el arco. Determina el tiempo de operación de la protección eléctrica.
I_{fg}	Corriente de falla a tierra	Valor eficaz de la corriente de falla a tierra.

En la figura 14 se encuentra la representación gráfica de las diferentes corrientes de cortocircuitos de acuerdo con la norma IEC 60909 – 2015 que es una figura de referencia para visualizar las diferentes corrientes de la tabla 18.

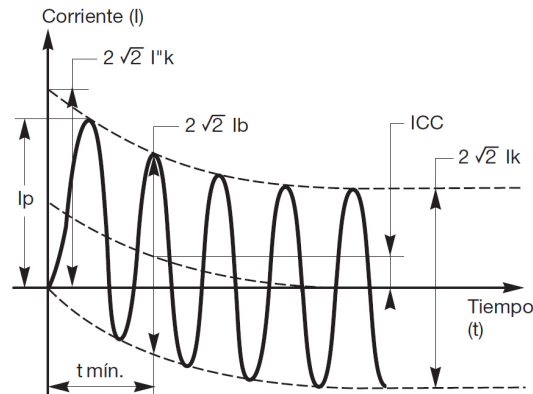


Figura 29. Representación gráfica de cantidades de cortocircuito según la norma IEC 60909 [60].

Para seleccionar la capacidad nominal de cortocircuito de los equipos, se aplicarán los criterios de la tabla 18.

Tabla 18. Descripción de los criterios de selección de los barrajes de los equipos.

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	CRITERIO
Ish	Corriente admisible de corta duración, 3s (Short-time withstand current, 3s)	$I_{sh} \geq I_k$
Ib	Corriente de corte en cortocircuito (Short-circuit breaking current)	$I_b \geq I''_k$
Ima	Corriente de cierre en cortocircuito (Short-circuit making current)	$I_{ma} \geq I_p$

- **Escenarios de Falla de Cortocircuito Relevantes**

Para el análisis de cortocircuito se considera que la Estación de Recarga Rápida para EVs tiene una sola alimentación a través de la red de distribución local a 13.2 kV con las condiciones normales de operación, y una alimentación de respaldo para la Estación en condiciones anormales de operación soportada con generación renovable asociada que consiste en generación fotovoltaica que está conectada al tablero general de distribución y suministra la energía a una tensión de 480V (ver figura 29). Las condiciones anormales se presentan cuando la alimentación por la red de distribución de energía eléctrica local no está disponible. La generación renovable conectada al tablero general de 480 V puede operar en conjunto con el suministro principal que llega desde la red de distribución de 13.2 kV.

De acuerdo con la topología de alimentación descrita se evaluaron los escenarios de falla del sistema eléctrico de la Estación de Recarga Rápida para EVs de la tabla 19.

En la tabla 19 la casilla que contiene “X” significa que el interruptor correspondiente está cerrado y el equipo se encuentra en operación.

Tabla 19. Escenarios de Falla del sistema, Producción Propia.

ÍTEM	INTERRUPTOR	ESCENARIOS		
		1	2	3
1	CC-01	X		X
2	CC-02	X		X
3	CC-03	X		X
4	CC-04	X	X	X
5	CC-05	X	X	
6	CC-06	X	X	X
7	CC-07	X	X	X
8	CC-08	X	X	X
	TRANSFORMADOR			
9	TRANSFORMADOR PRINCIPAL	X		X
	SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE			
10	CELDA FOTOVOLTAICAS	X	X	
	CARGAS			
11	LOAD 1: SURTIDOR EVSE 1	X	X	X
12	LOAD 2: SURTIDOR EVSE 2	X	X	X

Escenario 1

El sistema eléctrico opera en condiciones normales y el alimentador que suministra potencia eléctrica de manera independiente y dedicada al transformador de 600 kVA a 13.2 kV, este entrega potencia a las cargas conectadas al barraje del Tablero de Distribución General de la Estación de Recarga Rápida las cuales son los puntos de carga rápida, igualmente hay una contribución de energía de la generación asociado con energía renovable al sistema de estudio. La falla se presenta en la barra del tablero general de 480V que se señala con la flecha roja en la figura 30.

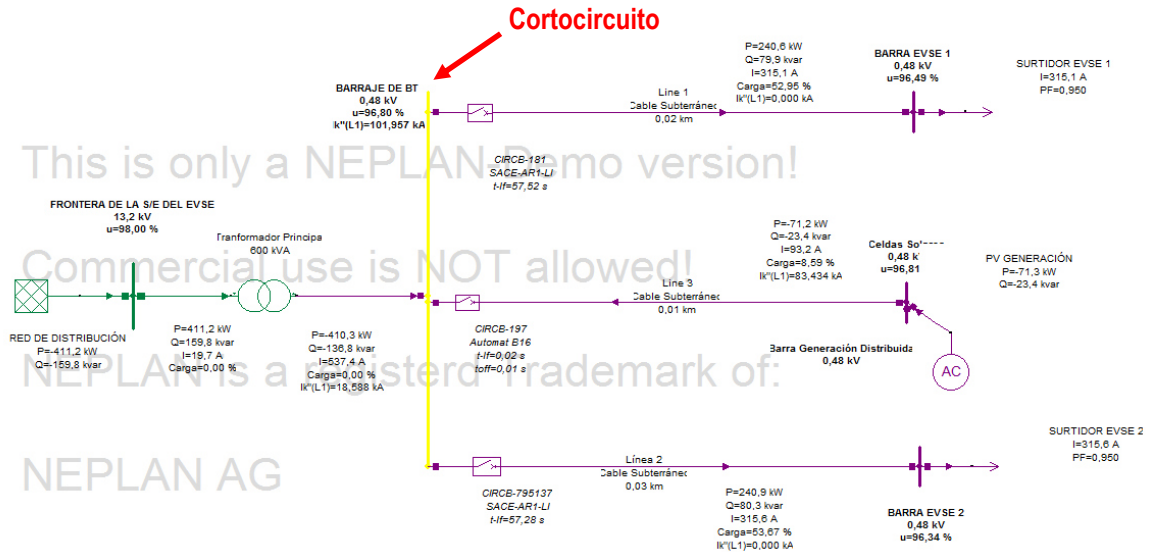


Figura 30. Escenario 1: Cortocircuito en el Barraje del Tablero general de 480V. Producción propia.

En la siguiente tabla 20 se comparan las variables del cortocircuito tales como: corrientes de cortocircuito y la tensión en el nodo en los casos de las potencias escogidas para EVSE para la falla trifásica en el barraje del tablero general de 480V. La caída de tensión es de 175 V frente a la tensión V_n del sistema en baja tensión lo que corresponde a una caída de tensión de 36.45% en los cuatro casos de potencias de EVSE de 20kW, 50 kW, 100 kW y 240 kW.

Tabla 20. Comparativo de Variables del Cortocircuito trifásica Barraje de Tablero general 480V en los sistemas de potencias de EVSE de 20kW, 50 kW, 100 kW y 240 kW. Producción Propia

ÍTEM	UBICACIÓN DE LA FALLA	I_k (RST) kA	V_L kV	TIPO DE FALLA
1	BARRAJE DE BT EVSE 240 KW, Transformador 600 kV 13.2/0.48 kV	101,957	305	Falla Trifásica
2	BARRAJE DE BT EVSE 100 KW, Transformador 225 kV 13.2/0.48 kV	27,950	305	Falla Trifásica
3	BARRAJE DE BT EVSE 50 KW, Transformador 150 kV 13.2/0.48 kV	80,291	305	Falla Trifásica
4	BARRAJE DE BT EVSE 20 KW, Transformador 75 kV 13.2/0.48 kV	23,394	305	Falla Trifásica

En la tabla 20 se presentan los valores de la corriente inicial simétrica de cortocircuito (I_k'') y la corriente pico de cortocircuito (I_p) sobre el barraje de 480 V de cada tablero de cada estación de recarga rápida con las potencias de EVSE: 20 kw, 50 kw, 100 kw y 240 kw. Los valores consignados en la tabla revelan que la infraestructura deberá estar especificada para componentes con mayor robustez a medida que aumente la corriente inicial simétrica de cortocircuitos (I_k'') y la corriente pico de cortocircuito (I_p), esto corresponderá al aumento de la potencia de los componentes de la estación de recarga rápida.

Aunque la infraestructura sea más robusta, la opción de construir estaciones de recarga que atenderán más vehículos eléctricos es más económicos en términos de presión sobre la red existente dado que será determinados nodos en la red eléctrica los que tendrán esta disposición, diferente a la alternativa de colocar recargadores individuales en cada domicilio aunque sean tipo I o tipo II, ya que la suma de estos equipos podrán ser utilizados masivamente en un futuro imprimiéndole más presión sobre los circuitos donde se conecten

Escenario 2

El sistema eléctrico opera en condiciones anormales con la contingencia siguiente: el alimentador que suministra potencia eléctrica de manera independiente y dedicada al transformador de 600 kVA con una tensión de 13.2 kV falla y no entrega potencia a las cargas conectadas al barraje del Tablero de Distribución General de la Estación de Recarga Rápida las cuales son los puntos de carga rápida, la generación renovable asociada alimenta el sistema eléctrico a través del tablero de distribución general. (Ver figura 28).

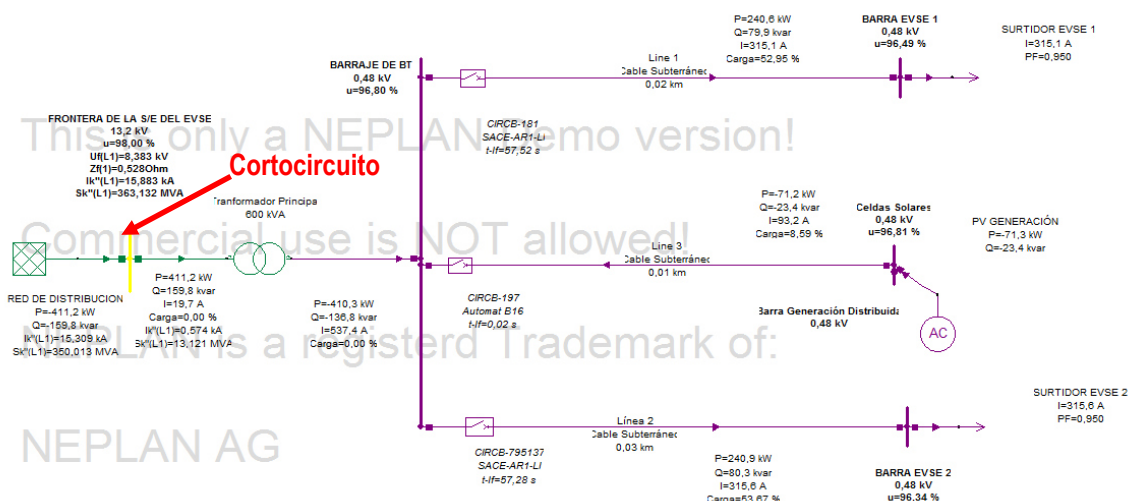


Figura 31. Escenario 2: Falla en la Frontera de la Subestación eléctrica de la Estación de Recarga Rápida para EV vista en el diagrama unifilar del NEPLAN. Producción propia.

Escenario 3

El sistema eléctrico opera en condiciones normales y el alimentador que suministra potencia eléctrica de manera independiente y dedicada al transformador de 150 kVA a 13.2 kV, este entrega potencia a las cargas conectadas al barraje del Tablero de Distribución General de la Estación de Recarga Rápida las cuales son los puntos de carga rápida. Los puntos de falla se señalan con la flecha roja en la figura 32.

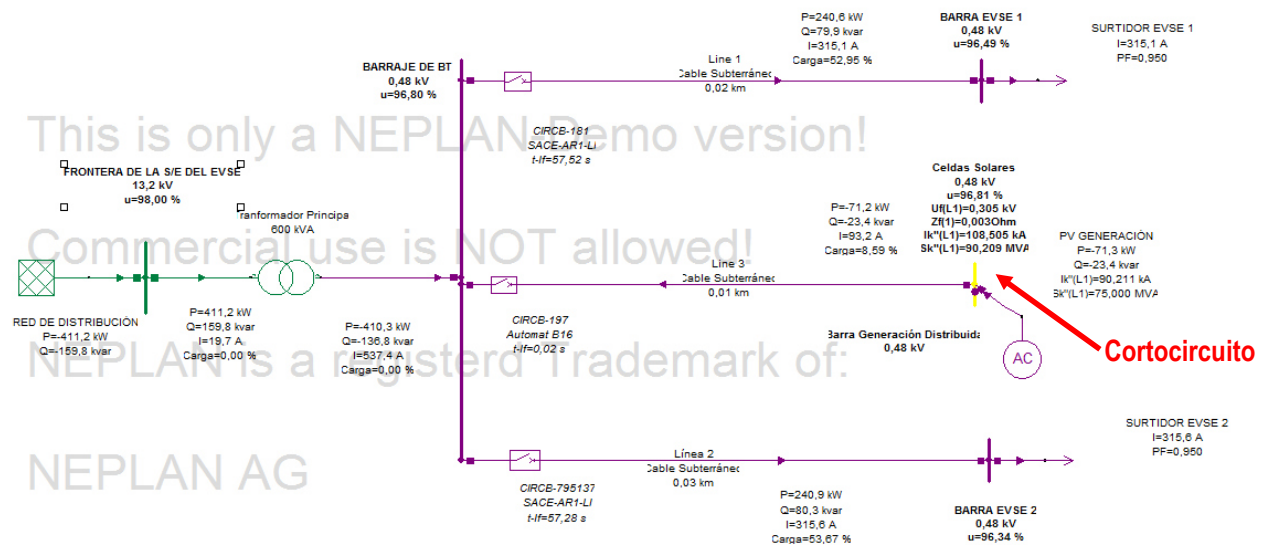


Figura 32. Escenario 3: Operación normal, las cargas de la Estación de Recarga Rápida para EV se alimenta solo desde el circuito de red local vista en el diagrama unifilar del NEPLAN. Producción propia.

- Resultados del Análisis de Cortocircuito

Como resumen de las simulaciones se presentan para cada escenario de operación y para el caso en donde los EVSE tienen una potencia de 50 kW y el transformador principal tiene una potencia de 150 kVA, las siguientes tablas:

- TABLAS 21-22-23-24 resumen de las corrientes de cortocircuito para los barrajes de los tableros y equipos principales para el escenario 1.
- TABLA 25 resumen de las corrientes de cortocircuito para los barrajes de los tableros y equipos principales para el escenario 2.
- TABLAS 26-27-28-29 resumen de las corrientes de cortocircuito para los barrajes de los tableros y equipos principales para el escenario 3.
- TABLAS 30-31-32 muestran las corrientes máximas de cortocircuito para los barrajes de los tableros y equipos principales de acuerdo a los escenarios estudiados.

Los valores obtenidos son teóricos y pueden ser utilizados para establecer la magnitud requerida por los barrajes de los equipos. Las tablas 20, 21, 22 y 23 presentan las corrientes de cortocircuito para las fallas: trifásica, monofásica a tierra, bifásica y bifásica a tierra, para el escenario 1 donde se alimenta desde la red eléctrica local y la generación renovable.

Tabla 21. Escenario 1 de Falla Trifásica, Producción Propia.

ÍTEM	UBICACIÓN DE LA FALLA	Vn	Ik" (RST)	Ip (RST)	Ib	Ik (RST)	TIPO DE FALLA
		kV	kA	kA	kA	kA	
1	BARRAJE DE BT	0,48	26,205	40,159	26,205	26,205	Falla Trifásica
2	Load 1	0,48	8,304	11,994	8,304	8,304	Falla Trifásica
3	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	15,455	38,078	15,455	15,455	Falla Trifásica
4	Celdas Solares	0,48	184,478	453,175	184,478	184,478	Falla Trifásica
5	Load 2	0,48	10,042	14,522	10,042	10,042	Falla Trifásica

Tabla 22. Escenario 1 de Falla Monofásica a Tierra, Producción Propia.

ÍTEM	UBICACIÓN DE LA FALLA	Vn	Ik" (RST)	Ip (RST)	Ib (RST)	Ik (RST)	TIPO DE FALLA
		kV	kA	kA	kA	kA	
1	BARRAJE DE BT	0,48	6,915	10,597	6,915	6,915	Falla Monofásica a Tierra
2	Load 1	0,48	3,972	5,736	3,972	3,972	Falla Monofásica a Tierra
3	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	0,005	0,011	0,005	0,005	Falla Monofásica a Tierra
4	Celdas Solares	0,48	5,572	13,688	5,572	5,572	Falla Monofásica a Tierra
5	Load 2	0,48	4,525	6,544	4,525	4,525	Falla Monofásica a Tierra

Tabla 23. Escenario 1 de Falla Bifásica, Producción Propia.

ÍTEM	UBICACIÓN DE LA FALLA	Vn	FASE	Ik"	Ip	Ib	Ik	TIPO DE FALLA
				(RST)	(RST)	(RST)	(RST)	
		kV		kA	kA	kA	kA	
1	BARRAJE DE BT	0,48	L1	0	0	0	0	Falla Bifásica
	BARRAJE DE BT	0,48	L2	7,257	11,121	7,257	7,257	
	BARRAJE DE BT	0,48	L3	7,257	11,121	7,257	7,257	
2	Load 1	0,48	L1	0	0	0	0	Falla Bifásica
	Load 1	0,48	L2	4,785	6,912	4,785	4,785	
	Load 1	0,48	L3	4,785	6,912	4,785	4,785	
3	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	L1	0	0	0	0	Falla Bifásica
	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	L2	13,321	32,82	13,321	13,321	
	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	L3	13,321	32,82	13,321	13,321	
4	Celdas Solares	0,48	L1	0	0	0	0	Falla Bifásica
	Celdas Solares	0,48	L2	7,222	17,741	7,222	7,222	
	Celdas Solares	0,48	L3	7,222	17,741	7,222	7,222	
5	Load 2	0,48	L1	0	0	0	0	Falla Bifásica
	Load 2	0,48	L2	5,29	7,65	5,29	5,29	
	Load 2	0,48	L3	5,29	7,65	5,29	5,29	

Tabla 24. Escenario 1 de Falla Bifásica A Tierra, Producción Propia.

ÍTEM	UBICACIÓN DE LA FALLA	Vn	FASE	Ik"	Ip	Ib	Ik	TIPO DE FALLA
				(RST)	(RST)	(RST)	(RST)	
		kV		kA	kA	kA	kA	
1	BARRAJE DE BT	0,48	L1	0	0	0	0	Falle Bifásica a Tierra
	BARRAJE DE BT	0,48	L2	11,376	17,433	11,376	11,376	
	BARRAJE DE BT	0,48	L3	11,266	17,266	11,266	11,266	
2	Load 1	0,48	L1	0	0	0	0	Falle Bifásica a Tierra
	Load 1	0,48	L2	6,157	8,893	6,157	6,157	
	Load 1	0,48	L3	5,011	7,238	5,011	5,011	
3	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	L1	0	0	0	0	Falle Bifásica a Tierra
	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	L2	13,321	32,82	13,321	13,321	
	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	L3	13,321	32,82	13,321	13,321	
4	Celdas Solares	0,48	L1	0	0	0	0	Falle Bifásica a Tierra
	Celdas Solares	0,48	L2	11,814	29,02	11,814	11,814	
	Celdas Solares	0,48	L3	9,718	23,872	9,718	9,718	
5	Load 2	0,48	L1	0	0	0	0	Falle Bifásica a Tierra
	Load 2	0,48	L2	7,05	10,195	7,05	7,05	
	Load 2	0,48	L3	5,796	8,382	5,796	5,796	

La tabla 25 presenta las corrientes de cortocircuito para la falla trifásica del escenario 2 donde la generación renovable asume toda la carga.

Tabla 25. Escenario 2 de Falla Trifásica, Producción Propia.

ÍTEM	UBICACIÓN DE LA FALLA	Vn	Ik" (RST)	ip (RST)	Ib	Ik (RST)	TIPO DE FALLA
		kV	kA	kA	kA	kA	
1	BARRAJE DE BT	0,48	22,74	32,879	22,739	22,739	Falla Trifásica
2	Load 1	0,48	7,86	11,339	7,86	7,86	Falla Trifásica
3	Celdas Solares	0,48	180,4	445,501	180,42	180,422	Falla Trifásica
4	Load 2	0,48	9,407	13,571	9,407	9,407	Falla Trifásica

Las tablas 26, 27, 28 y 29 presentan las corrientes de cortocircuito para las fallas: trifásica, monofásica a tierra, bifásica y bifásica a tierra, para el escenario 3 donde se alimenta desde la red eléctrica local sin la generación renovable la cual se encuentra desconectada.

Tabla 26. Escenario 3 de Falla Trifásica, Producción Propia.

ÍTEM	UBICACIÓN DE LA FALLA	Vn	Ik" (RST)	ip (RST)	Ib	Ik (RST)	TIPO DE FALLA
		kV	kA	kA	kA	kA	
1	BARRAJE DE BT	0,48	4,803	9,817	4,803	4,803	Falla Trifásica
2	Load 1	0,48	3,854	6,378	3,854	3,854	Falla Trifásica
3	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	15,31	37,802	15,309	15,309	Falla Trifásica
4	Load 2	0,48	4,082	6,994	4,082	4,082	Falla Trifásica

Tabla 27. Escenario 3 de Falla Monofásica a Tierra, Producción Propia.

ÍTEM	UBICACIÓN DE LA FALLA	Vn	Ik" (RST)	ip (RST)	Ib (RST)	Ik (RST)	TIPO DE FALLA
		kV	kA	kA	kA	kA	
1	BARRAJE DE BT	0,48	4,902	10,02	4,902	4,902	Falla Monofásica a Tierra
2	Load 1	0,48	3,336	5,52	3,336	3,336	Falla Monofásica a Tierra
3	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	0,005	0,011	0,005	0,005	Falla Monofásica a Tierra
4	Load 2	0,48	3,679	6,303	3,679	3,679	Falla Monofásica a Tierra

Tabla 28. Escenario 3 de Falla Bifásica, Producción Propia.

ÍTEM	UBICACIÓN DE LA FALLA	Vn	FASE	Ik"	Ip	Ib	Ik	TIPO DE FALLA
		kV		(RST)	(RST)	(RST)	(RST)	
				kA	kA	kA	kA	
1	BARRAJE DE BT	0,48	L1	0	0	0	0	Falla Bifásica
	BARRAJE DE BT	0,48	L2	4,16	8,502	4,16	4,16	
	BARRAJE DE BT	0,48	L3	4,16	8,502	4,16	4,16	
2	Load 1	0,48	L1	0	0	0	0	Falla Bifásica
	Load 1	0,48	L2	3,338	5,523	3,338	3,338	
	Load 1	0,48	L3	3,338	5,523	3,338	3,338	
3	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	L1	0	0	0	0	Falla Bifásica
	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	L2	13,258	32,737	13,258	13,258	
	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	L3	13,258	32,737	13,258	13,258	
4	Load 2	0,48	L1	0	0	0	0	Falla Bifásica
	Load 2	0,48	L2	3,535	6,057	3,535	3,535	
	Load 2	0,48	L3	3,535	6,057	3,535	3,535	

Tabla 29. Escenario 3 de Falla Bifásica a Tierra, Producción Propia.

ÍTEM	UBICACIÓN DE LA FALLA	Vn	FASE	Ik"	Ip	Ib	Ik	TIPO DE FALLA
		kV		(RST)	(RST)	(RST)	(RST)	
				kA	kA	kA	kA	
1	BARRAJE DE BT	0,48	L1	0	0	0	0	Falle
	BARRAJE DE BT	0,48	L2	4,878	9,97	4,878	4,878	Bifásica a
	BARRAJE DE BT	0,48	L3	4,831	9,874	4,831	4,831	Tierra
2	Load 1	0,48	L1	0	0	0	0	Falle
	Load 1	0,48	L2	3,989	6,602	3,989	3,989	Bifásica a
	Load 1	0,48	L3	3,247	5,373	3,247	3,247	Tierra
3	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	L1	0	0	0	0	Falle
	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	L2	13,258	32,737	13,258	13,258	Bifásica a
	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	L3	13,258	32,737	13,258	13,258	Tierra
4	Load 2	0,48	L1	0	0	0	0	Falle
	Load 2	0,48	L2	4,262	7,301	4,262	4,262	Bifásica a
	Load 2	0,48	L3	3,504	6,003	3,504	3,504	Tierra

La tabla 30 presenta las corrientes de cortocircuito máximas que se observan comparando las magnitudes en todos los tipos de fallas y escenarios.

Tabla 30. Corrientes máximas de cortocircuito para los barrajes de los tableros y equipos principales de acuerdo a los escenarios estudiados, Producción Propia.

ÍTEM	UBICACIÓN DE LA FALLA	Vn	Ik"	Ip	Ib	Ik (RST)	ESCENARIO	TIPO DE FALLA
		(RST)	(RST)	(RST)	(RST)			
		kV	kA	kA	kA	kA		
1	BARRAJE DE BT	0,48	26,205	40,159	26,205	26,205	1	Falla Trifásica
2	BARRAJE DE BT	0,48	22,739	32,879	22,739	22,739	2	Falla Trifásica
3	Celdas Solares	0,48	180,42	445,501	180,42	180,422	2	Falla Trifásica
4	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	13,321	32,82	13,321	13,321	1	Falla Bifásica
5	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	13,321	32,82	13,321	13,321	1	Falla Bifásica a Tierra
6	Celdas Solares	0,48	11,814	29,02	11,814	11,814	1	Falla Bifásica a Tierra
7	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	15,309	37,802	15,309	15,309	3	Falla Trifásica
8	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	13,258	32,737	13,258	13,258	3	Falla Bifásica
9	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	13,258	32,737	13,258	13,258	3	Falla Bifásica a Tierra

Tabla 31. Corrientes valores máximos de falla en cada equipo Ik" (kA) de acuerdo a los escenarios estudiados, Producción Propia.

ÍTEM	UBICACIÓN DE LA FALLA	Vn	Ik"	ESCENARIO	TIPO DE FALLA
		(RST)	(RST)		
		kV	kA		
1	BARRAJE DE BT	0,48	26,205	1	Falla Trifásica
2	Celdas Solares	0,48	184,478	1	Falla Trifásica
3	Load 1	0,48	8,304	1	Falla Trifásica
4	Load 2	0,48	10,042	1	Falla Trifásica
5	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	15,455	1	Falla Trifásica

Tabla 32. Corrientes valores máximos de falla a tierra en estado estacionario I_k (kA) de acuerdo a los escenarios estudiados, Producción Propia.

ÍTEM	UBICACIÓN DE LA FALLA	V_n	I_k (RST)	ESCENARIO	TIPO DE FALLA
		kV	kA		
1	BARRAJE DE BT	0,48	26,205	1	Falla Trifásica
2	Celdas Solares	0,48	184,478	1	Falla Trifásica
3	Load 1	0,48	8,304	1	Falla Trifásica
4	Load 2	0,48	10,042	1	Falla Trifásica
5	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	13,2	15,455	1	Falla Trifásica

El mayor valor de la corriente de falla monofásica a tierra de estado permanente (I_k), en todos los escenarios a nivel de 13.2 kV corresponde a 15,455 kA en los barrajes. Se observa que los niveles de cortocircuito en los tableros de baja tensión a nivel de 480 V son altos siendo la mayor magnitud la que presenta la generación renovable por celdas solares con 184,478 kA al ser un aportante al cortocircuito en su calidad de generador. Los sistemas de aislamiento de los equipos en relación deben tener en cuenta la corriente de cortocircuito presentada en este barraje.

Estas corrientes de corto circuitos se tendrán que tener en cuenta para el diseño de las puestas a tierra de los equipos individuales y conectarse entre sí como se recomienda en el RETIE estableciendo una equipotenciabilidad que evite que existan entre las mallas de puesta a tierra individuales diferencias de tensión que produzcan corrientes en el sistema. También, se tendrán en cuenta estas corrientes para el dimensionamiento de las protecciones eléctricas. El sistema de puesta a tierra de las celdas solares deberá tener una resistencia limitadora a tierra para que la corriente de cortocircuito que reporta el análisis sea menor y se ajuste cantidades cercanos a los 27kA que se manejará en el sistema eléctrico de la estación de recarga, la determinación de la capacidad de esta resistencia limitadora a tierra no es alcance de este trabajo.

3.2.1. Análisis de Armónicos para la Estación de Recarga Rápida para EVs

Las simulaciones y resultados del análisis de armónicos realizado al sistema eléctrico de la Estación de recarga Rápida para EVs propuesto con el fin de determinar las distorsiones de la onda seno que se inyectarían desde la carga de los EVSE instalados en la Estación de Recarga rápida al sistema de distribución eléctrica desde donde se alimentará la estación. Esta distorsión armónica que se presentan en estado estable se observarán en la onda de corriente y de tensión del sistema en estudio. El análisis de armónicos está relacionado a los problemas de calidad de la energía que de acuerdo con la norma IEEE std 1159 de 2009 [89] se refiere a muchos problemas que caracterizan las ondas de tensión y corriente de un sistema eléctrico; de estos problemas vinculados a la calidad de la energía solo se aborda el caso planteado en este ítem en cuanto al análisis de armónicos dado que se espera observar el comportamiento del sistema eléctrico de la estación de recarga rápida con su generación renovable asociada, así mismo la estación de recarga rápida en interacción en el sistema de distribución eléctrica al que se conecta.

Para propósitos de modelado de sistemas eléctricos la tensión y la corriente del suministro de energía presentan una onda perfectamente sinusoidal, sin embargo, en la práctica las formas de ondas presentan distorsiones por causa de armónicos los cuales son señales cuya frecuencia es un múltiplo entero de la onda fundamental. La suma de estas señales da como resultado la señal distorsionada original, siendo esta 60 Hz y los armónicos que más se generan en los sistemas eléctricos son los de orden impar. En este análisis estas desviaciones con respecto a la onda fundamental se expresa en términos de distorsión armónica (THD)[36].

La THD es la relación entre la raíz cuadrada media del contenido armónico, teniendo en cuenta los componentes armónicos hasta el orden 50° y excluyendo específicamente interarmónicos, expresada como un porcentaje de la fundamental. Los componentes armónicos de orden mayor que 50 pueden ser incluidos cuando sea necesario [69]; tal definición se puede observar en la ecuación (7)

$$THD = \frac{\sqrt{(\sum I_h^2)}}{I_f} = \text{Distorsión Armónica Total}$$

(7) [36].

Donde:

I_h = Componente armónica

h = Número del armónico

If = Componente fundamental

Un componente interarmónico de frecuencia de una cantidad periódica que no es un múltiplo entero de la frecuencia a la que el sistema de suministro está en funcionamiento (por ejemplo, 50 Hz o 60 Hz)[69], por tanto se excluye de la fórmula de THD. Esta fórmula calcula la distorsión armónica total de corriente para una onda de corriente THDi. Para calcular la distorsión armónica total de tensión THDv por su sigla en Inglés, se puede calcular con la formula (7) reemplazando los valores de corriente por los de tensión eléctrica.

La figura 12 presenta el diagrama unifilar de la estación de recarga rápida para EVs para el análisis de armónicos.

La distorsión armónica tienen sus causas típicas en la saturación magnética de transformadores, cargas industriales como por ejemplo: hornos o soldadores de arco, variadores de velocidad (VSD por sus siglas en inglés "Variable Speed Drive"), o equipos de carga rápida de EVs. Estas cargas conectadas a la red tienen un comportamiento no lineal que introducen armónicos de tensión y corriente en las redes de distribución, industriales o domiciliarias, provocando efectos negativos a los elementos asociados a la red. Estos efectos pueden ser:

- Deterioro de la capacidad dieléctrica en los materiales por sobretensión.
- Fallas de aislamiento y aumento de pérdidas debido a corrientes armónicas excesivas.
- Falla en el funcionamiento de equipos de protección, control y medida.
- Fallas en equipos de automatización de sistemas autónomos.

Los fenómenos armónicos son de difícil detección por presentarse en estado estable y cuyos efectos dependen de la historia de operación, siendo acumulativos en el tiempo, por tal motivo no son asociados a la falla como causa real cuando los dispositivos, materiales y elementos de la red colapsan. La onda sinusoidal de AC a la frecuencia fundamental (60 Hz), seguida de los armónicos: 2°, 3°, 4° y 5°; en cada gráfica se observa la relación de frecuencia angular de las ondas (ω), entre mayor es el armónico entonces la frecuencia (ω) se hace más grande [36].

Para el estudio de los armónicos se utilizan las series de Fourier que facilitan la descomposición en las ondas componentes por la Superposición de la Fundamental y Menores Armónicos de la Onda Deformada Compuesta. La onda deformada se compone de la fundamental combinada con los armónicos de 3° y 5° orden. Para el análisis de armónicos se estableció niveles de armónicos sobre los equipos de carga para EVs de acuerdo con los ensayos realizados y reseñados en la literatura de referencia. Los armónicos de orden

específica para los EVSE fueron incorporados en el diseño del sistema eléctrico de estudio que se simula en el software NEPLAN para establecer los niveles de armónico. Se analizaron diferentes niveles de armónicos los cuales se estimaron para las cargas y para el sistema de generación con celdas solares y observando los diferentes niveles de armónico en los barrajes como se presentan en las tablas. Los niveles de armónicos estimados se realizaron en primera instancia incorporando los niveles de armónico para el 3° y 5° armónico para los surtidores de carga y luego para el sistema de generación, para observar su aporte dentro de los barrajes y los inyectados a la red de distribución.

Los criterios para evaluar los niveles de armónicos para el sistema en estudio son los límites establecidos en la norma IEEE Std 519 del 2014, y que se presentan en la tabla 32. En esta tabla se observa que para 480 V el armónico individual no debe ser mayor al 5% mientras que la distorsión armónica total THD no debe superar el 8%. Para las tensiones en el rango de media tensión (13200V) que se presenta en la alimentación por la red local a la estación de Recarga Rápida se debe cumplir con que el armónico individual no debe ser mayor al 3% mientras que la distorsión armónica total THD no debe superar el 5% de acuerdo con la tabla 33 extraída de la norma IEEE 519 [69].

Tabla 33. Límites de distorsión de tensión eléctrica [69].

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0$ kV	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69$ kV	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161$ kV	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 ^a

Para el análisis de armónicos se considera que la Estación de Recarga Rápida para EVs tiene una sola alimentación a través de la red de distribución local a 13.2 kV con una generación renovable con celdas solares asociada al sistema que genera a 480 V. Las cargas establecidas son los EVSE los cuales son la fuente de generación de los armónicos inyectados al sistema y a la red de distribución local. El escenario de estudio es por tanto el funcionamiento normal de la Estación de recarga rápida para EVs.

- **Resultados del Análisis de Armónicos**

Como resumen de las simulaciones se presentan para cada escenario de operación los resultados en las tablas 34 y 35.

Escenario de estudio donde generación de armónicos por EVSE y la Generación renovable

Para este escenario se dispone que la distorsión armónica para tensión y corriente en el 3° y 5° son generados por las cargas y la generación renovable asociada, las cuales son la fuente de armónicos; siendo las cargas los equipos EVSE 1 y 2. La forma de onda de la carga por acción de los armónicos de 3° y 5° orden se muestra en la figura 27 la cual es inyectada en el tablero general de 480 V.

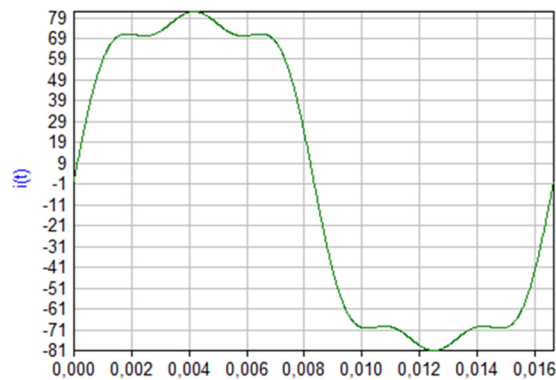


Figura 33. Forma de onda deformada compuesta por la superposición de la fundamental a 60 Hz de los armónicos 3° y 5° orden para la carga.

Para el caso en que los EVSE tienen una potencia de 50 kW y el transformador principal es de 150 kVA se presentan estos armónicos los valores de THD se encuentran dentro de los rangos de la norma IEEE 519 los cuales se verifican en la tabla 34. Para la frontera de la subestación eléctrica de la Estación de Recarga Rápida el porcentaje de THDv es cero que es favorable para la red eléctrica de distribución.

El barraje de 480 V en el tablero general es el que recibe la mayor cantidad de armónico lo cual se traduce en una disipación de calor en sus barras y en los componentes conectados a esta, tales condiciones no debe sobrepasar los niveles permitidos de temperatura de operación de los fabricantes para evitar sobrecalentamientos y pérdidas.

Por otro lado, la red de distribución no recibe armónicos con lo que se considera que son atenuados en las bobinas del transformador por los efectos inductivos del mismo.

Tabla 34. Resultados en los nodos de distorsión de tensión eléctrica para el 3° y 5° armónico. Producción propia.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	THD	F	V	v	V Ángulo
		%	Hz	V	%	°
1	BARRAJE DE BT	0,24	180	0,8808	0,19	59,92
			300	0,6632	0,14	70,48
2	Celda Solar	0,06	180	0,2207	0,05	91,02
			300	0,1846	0,04	90,63
3	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	0	180	0,3602	0	63,3
			300	0,2719	0	72,51
4	Load 1	0,4	180	1,525	0,33	49,31
			300	1,075	0,23	62,42
5	Load 2	0,36	180	1,360	0,29	51,02
			300	0,9710	0,21	63,79

Los valores de distorsión total de corriente eléctrica THDi se pueden observar en la tabla 35 revelados en la corrida del software para un sistema donde los EVSE son de 50 kW y el transformador principal es de 150 kVA. Esto corresponde a una carga no controlada de armónicos.

La distorsión total de corriente en la frontera fue de 3,6% que está dentro de valores manejables para la red de distribución en este caso en particular. Es posible que una mayor cantidad de Estaciones de Recarga de iguales o mayor capacidad pueda alterar drásticamente las condiciones de la red pero la verificación de esta condición está por fuera del alcance de este trabajo, tales observaciones son coincidentes con estudios similares [73]. Sin embargo, el sistema eléctrico en 480 V de la estación de recarga rápida tiene un ambiente de armónicos que supera lo requerido por la norma IEC 61000-3-2 [90] en el barraje donde se conecta la generación renovable con armónicos de corriente mayores a 47 % e THDi. Con lo cual se presentarán condiciones de sobrecalentamiento en los componentes por disipación de la energía producto de las componentes de armónicos que se observan.

Tabla 35. Resultados en los elementos de distorsión de corriente eléctrica para el 3° y 5° armónico.
Producción propia.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	THDi	F	I _{rms}	I1	I1 Ángulo	I2	I2 Ángulo
		%	Hz	A	A	°	A	°
1	BARRAJE DE BT	21,47	180	68,17	12,800	180	12,800	0
			300		6,400	180	6,400	0
2	Celda Solar	48,36	180	59,31	23,079	2,93	23,079	182,93
			300		11,584	1,77	11,584	181,77
3	FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	3,6	180	3,12	0,1022	155,21	2,811	-24,79
			300	84,21	0,0463	163,66	1,273	-16,34
4	Load 1	21,51	180	68,07	12,800	180	12,800	0
			300		6,400	180	6,400	0
5	Load 2	3,6	180	3,12	0,1022	215,21		
			300		0,0463	223,66		

Los resultados están de acuerdo con la literatura disponible sobre estudios similares de comportamientos de sistemas eléctricos de estaciones de recarga rápida [73]. Para este escenario no se contempla el aporte de otras fuentes de armónicos conectados como sistemas para servicios auxiliares como iluminación, equipos de cómputo o UPS.

Para el caso donde los EVSE tienen un potencia de 20 kW los armónicos detectados en el sistema eléctrico de la Estación de recarga rápida se observan en la figura 22.

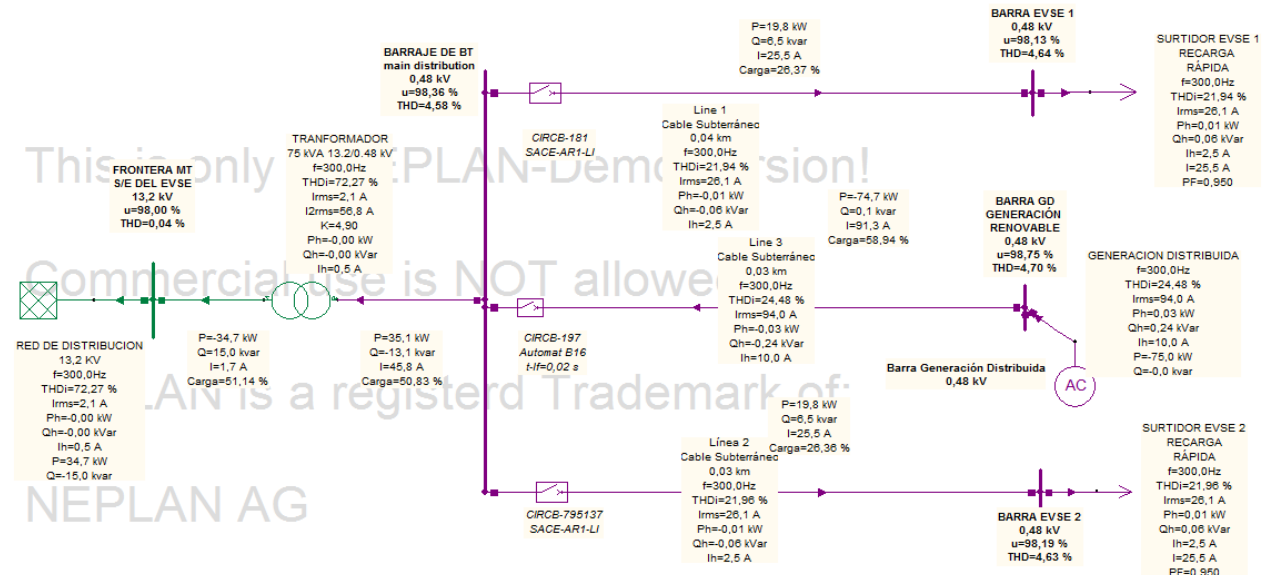


Figura 34. Escenario 1: EVSE 20 kW Transformador de 75 kVA, Armónicos de 3° y 5° orden inyectados por los EVSE al sistema de la Estación de Recarga Rápida para EV. Producción propia.

Como el caso anterior la figura 34 donde los EVSE 1 y 2 tienen una potencia de 20 kW y un Transformador de 75 kVA se observa que los armónicos de corriente se mantienen cercanos al límite recomendado por la norma IEC 61000 por debajo del 23% THDi en los surtidores 1 y 2, pero superados en los conductores de alimentación y en los armónicos de corriente inyectados en la red de distribución local, lo que ocasionará elevaciones de temperatura en los componentes afectados. Los valores de THDv están por debajo de los límites de la norma IEEE 519 en la frontera donde se conecta al sistema de distribución y dentro del sistema de la Estación de recarga rápida en tensión de 480 V al mantenerse por debajo de los 5% THDv.

Para el caso anterior la figura 35 donde los EVSE 1 y 2 tienen una potencia de 240 kW y un Transformador de 600 kVA se observa que los armónicos de corriente se mantienen cercanos al límite recomendado por la norma IEC 61000 por debajo del 23% THDi en los surtidores 1 y 2, pero superados en los conductores de alimentación y en los armónicos de corriente inyectados en la red de distribución local, lo que ocasionará elevaciones de temperatura en los componentes afectados. Los valores de THDv están por debajo de los límites de la norma IEEE 519 en la frontera donde se conecta al sistema de distribución y dentro del sistema de la Estación de recarga rápida en tensión de 480 V al mantenerse por debajo de los 5% THDv.

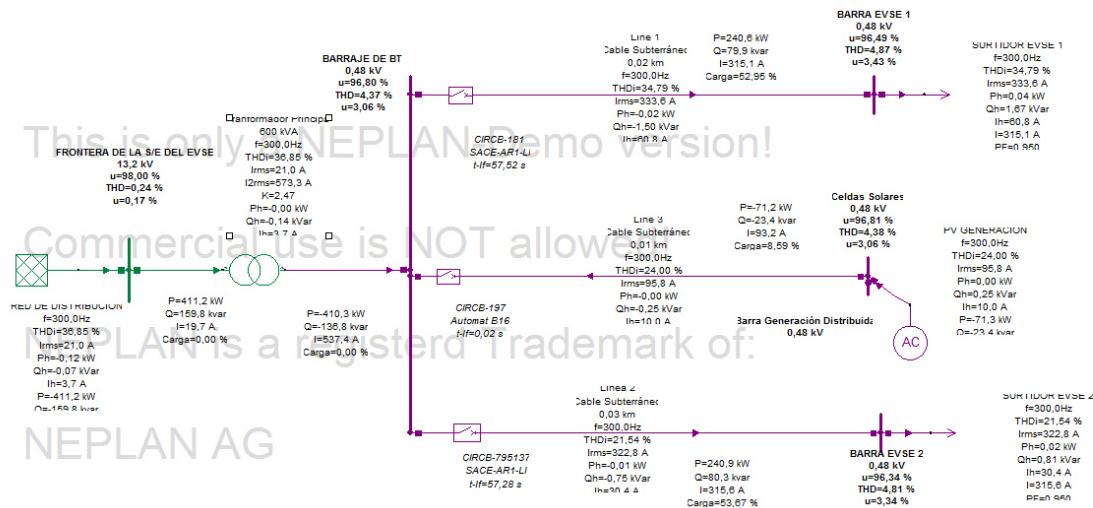


Figura 35. Escenario 1: EVSE 240 kW Transformador de 600 kVA, Armónicos de 3° y 5° orden inyectados por los EVSE al sistema de la Estación de Recarga Rápida para EV. Producción propia.

- Resultados del Análisis de Armónicos para Cortocircuito para las potencias de EVSE de 20kw, 50 kw, 100 kw y 240 kw

En la tabla 36 presenta los resultados en todas las simulaciones para las cuatro (4) diferentes potencias seleccionadas de EVSE que conforman las estaciones de recarga rápida de EV. Los resultados en todas las corridas de las cuatro simulaciones se observan valores que cumplen con el límite que exige la norma IEEE 519 en un rango de tensión entre $1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$ el THD total debe por estar por debajo de 5% de acuerdo con la tabla 32 y es así como en la frontera de la subestación de la Estación de Recarga rápida para vehículos eléctricos los resultados arrojan que el sistema en estudio no entrega a la red niveles significativos de armónicos. Sin embargo, los resultados de estas simulaciones deberán confrontarse con mediciones de armónicos en una estación de recarga existente o en los equipos EVSE.

Tabla 36. Resultados en los nodos de distorsión de tensión eléctrica para las potencias de EVSE 20kw, 50 kw, 100 kw y 240 kw. Producción

BARRA DE MEDIDA DE THD	240 kw	100 kw	50 kw	20kw
	THD (%)	THD (%)	THD (%)	THD (%)
BARRAJE DE BT (MEDIA TENSIÓN)	3,37	4,38	3,97	4,64
Celdas Solares (Baja tensión: 480 V)	3,49	4,5	4,1	4,64
FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE	0,18	0,09	0,06	0,04
SURTIDOR 1 (EVSE)	3,67	4,54	4,12	4,7
SURTIDOR 2 (EVSE)	3,82	4,62	4,08	4,68

Capítulo IV: Conclusiones

4.1. Conclusiones

- El sistema de generación renovable asociado al sistema de la estación de recarga rápida es esencial para aplanar la curva de demanda y mitigar los efectos adversos de cargabilidad de las redes de distribución eléctrica a los que pueda conectarse.
- El análisis de flujo de potencia del sistema comprueba que la estación de recarga rápida para EVs es funcional en el modelo en los escenarios estudiados, en particular el escenario 1 donde la red de distribución y el sistema de generación renovable comparten la carga de la estación junto con el escenario 2 donde la generación renovable asume el total de la carga pueden ser opciones normales de funcionamiento.
- La Estación de recarga rápida para vehículos eléctricos puede ser alimentada completamente desde la generación renovable y su banco de baterías como se muestra en el análisis del estado dinámico, los valores de tensión y cargabilidad del sistema se conservan presentando un sistema estable a lo largo del tiempo de la simulación.
- La estación de recarga rápida para EVs modelada es capaz de funcionar aislada del sistema de distribución solo alimentada por generación renovable con lo cual se obtiene que el sistema de distribución local evite ser sobredimensionado con esta carga adicional.
- El análisis de armónicos para el sistema eléctrico de la estación de recarga rápida presenta niveles de armónico nulos en el escenario 1 y bajo el límite que exige la norma IEEE 519 en el escenario 2 midiendo el THDv en la frontera del sistema de la estación donde se conecta con la red de distribución local este dato se corrobora en el total de las simulaciones realizadas en los sistemas con diferentes capacidades de EVSE observado en la tabla 36.
- Los armónicos de corriente THDi inyectados a la red de distribución por la estación de recarga rápida está levemente por fuera de la norma IEC61000 con lo que se hace necesario hacer inversiones de bancos de condensadores por el lado de alta tensión o utilizando transformadores con tres devanados. Los equipos EVSE y de generación renovable deberá seleccionarse cumpliendo las normas IEEE 519 e IEC 61000.

- Las características de los EVSE y los componentes del sistema de generación renovable deberán contener elementos atenuadores de armónicos, ya sea dinámicos o pasivos, acordes a los niveles de armónicos que produzcan, ésta tecnología está disponible.
- El análisis de cortocircuito para el sistema arroja que el generador renovable aporta una importante cantidad de corriente de cortocircuito al sistema con lo que se hace necesario el diseño e implementación de una resistencia limitadora de corriente de falla para este sistema, al igual que el dimensionamiento de la malla de puesta a tierra que cubra esta generación la cual deberá conectarse equipotencialmente a las otras mallas asociadas a este sistema.
- La resistencia limitadora de corriente de corto circuito deberá dimensionarse para igualar la corriente de cortocircuito del tablero general de distribución con lo que las protecciones eléctricas se ajustarán a valores de cortocircuito normalizados con los equipos presentes en el mercado y previstos para proteger los equipos suministrados.
- Para la implementación exitosa y rápida de los EV's se requiere que se realicen actualizaciones de las normas y reglamentos en Colombia acordes con la tecnología prevista y disponibles en el mercado, teniendo en cuenta condiciones de seguridad que mitiguen riesgos eléctricos en los usuarios de los equipos de recarga, estableciendo características de componentes, materiales y equipos que favorezcan políticas de calidad y uso eficiente de la energía, y presentando metodologías para instalación, montaje y puesta en marcha de obras asociadas con los equipos de carga de EV's.
- Para el diseño, montaje y puesta en marcha de proyectos relacionados con equipos de cargas de EV's EVSE se requiere establecer flujogramas claros y concisos que guíen el desarrollo de los proyectos acordes con las buenas prácticas de ingeniería donde se presenten un mínimo de tareas cuya integración den por resultado el proyecto completo.

4.2. Contribuciones del proyecto de investigación (Publicaciones)

- [1] Ortega Carrascal, Héctor A., Rosero García, Javier. "Review of NTC 2050 and NFPA 70 on their section dedicated to equipments for Electrical Vehicles recharge systems". Print ISBN: 978-1-5090-0227-6. Engineering Applications - International Congress on Engineering (WEA), 2015 Workshop on - IEEE. Bogotá, Colombia. 2015.

4.3. Futuros Proyectos

Se proponen los siguientes trabajos futuros de investigación:

- Modelamiento de un Equipo piloto de suministro de vehículo eléctrico EVSE.
- Modelamiento de Equipo piloto de una estaciones de recarga de vehículos eléctricos (EVs) y generación renovable asociada.
- Estudios de metodologías para la mitigación de distorsiones armónicas producidas por sistemas de recarga rápida para vehículos eléctricos en redes de distribución en ciudades principales de Colombia.
- Desarrollo de una guía técnica para la instalación de estaciones de recarga para vehículos eléctricos en infraestructuras eléctricas en Colombia.
- Optimización de los Impactos de armónicos producidas por sistemas de recarga rápida para vehículos eléctricos en los transformadores de distribución instalados sobre redes eléctricas de distribución en municipios de Colombia.
- Análisis de bidireccional de flujo de potencia de sistemas eléctricos con equipos de carga para vehículos eléctricos instalados sobre redes eléctricas de distribución de Colombia.
- Estudios técnicos económicos para la implementación de sistemas autónomos públicos de carga para vehículos eléctricos alimentados por sistemas fotovoltaicos en los municipios de: Medellín, Bucaramanga, Bogotá, Barranquilla, Manizales, Tunja, Villavicencio, Barranquilla, Santa Marta, Cartagena, Pasto, Cali, Cúcuta, Chía, Cota, Tocancipá y La Calera.

A. Anexo:

A.1. Desarrollo del Diseño Eléctrico de la Estación de Recarga Rápida

A.1.1. Selección del Transformador Eléctrico

Se establece el diseño para las condiciones de la Ciudad de Bogotá por tanto las condiciones referidas son las siguientes:

El transformador debe operar a la potencia nominal continua sin que el incremento de temperatura promedio en los devanados supere los 55°C, ni 70°C de incremento de temperatura en el punto más caliente del conductor. El incremento de temperatura en el nivel superior del aceite no exceda los 55°C. Para cargas mayores a la carga nominal, se debe referir a la guía de cargabilidad ANSI/IEEE C57.91ó

GTC 50. El transformador objeto de esta norma debe ser apto para operar continuamente a la potencia nominal, siempre y cuando la temperatura ambiente máxima del encerramiento no sobrepase los 50°C y la temperatura promedio del ambiente del encerramiento no exceda de 40°C para cualquier periodo de 24 horas.

Para la empresa local de distribución de energía eléctrica las potencias nominales normalizadas son 30, 45, 75, 112.5, 150, 225, 300, 400, y 500 KVA, por tanto la potencia adecuada para los requerimientos energéticos de la Estación de Carga para EV es 150 kVA. Para cálculos posteriores se establecerá esta potencia como entrada base. Como criterio del diseño se toman valores de potencia que se tengan establecidos, en este caso por el estándar de la empresa de energía y con esto se facilitará la procura de los elementos y equipos requeridos por la ingeniería en los mercados locales.

De acuerdo con la carga que se alimentará presentada en la tabla 4 se requiere un transformador de una capacidad de 150 kVA, trifásico 13,2/0,480 kV, 60Hz, U=4%, con el neutro accesible externamente y sólidamente puesto a tierra. Esta capacidad es suficiente para suministrar energía suficiente para la carga de interés y para sistemas de servicios auxiliares tales como iluminación y tomas que se requieran en el establecimiento asociado o la infraestructura adyacente a la estación de carga de EV que se estiman en 30 kVA y lo restante (15 kVA) corresponde a potencia disponible para futuras ampliaciones. Los valores está normalizados en la tabla 7 extraída del estándar de la empresa de energía local (CODENSA).

Tabla A1. Pérdidas de transformación, elección del transformador por potencia [22].

PÉRDIDAS TÉCNICAS	30 KVA	45 KVA	75 KVA	112,5 KVA	150 KVA	225 KVA	300 KVA	500 KVA
Pérdidas máximas en vacío (Vatios)	135	180	265	365	450	615	765	1090
Pérdidas en Carga a 85°C (Vatios)	515	710	1090	1540	1960	2890	3675	5780
Pérdidas máximas totales a 85°C (Vatios)	650	890	1355	1905	2410	3505	4440	6870

Los valores nominales de tensión empleados en el sistema eléctrico de la ciudad de Bogotá se soportan en las normas de la empresa de distribución de energía local [22]. Para las salidas de equipos de carga de EV se escoge las tensiones resaltadas en la tabla A2 compatibles con la red eléctrica por media tensión y la alimentación a los EVSE que se conectarán al tablero de distribución que se conectará al transformador de 150 kVA.

Tabla A2. Valores de tensión, derivaciones y nivel de aislamiento, elección del transformador por tensiones de MT y BT [22].

Tensión Nominal en M.T. (V)	Tensión a plena carga en B.T. (V).	Derivaciones en A.T.
11400-13200	208/120	+1X2,5% y -3X2,5%
11400-13200	480/277	+1X2,5% y -3X2,5%
11400-13200	380/220	+1X2,5% y -3X2,5%

La impedancia de corto circuito establecida para el transformador de 150 kVA se establece en $U=4\%$ de acuerdo con la tabla A3 como se resalta.

Tabla A3. Impedancias de corto circuito [22].

Potencia nominal del transformador (kVA)	Impedancia de cortocircuito referida a 85 °C (%)
30-45	3.0
75 – 112.5	3,5
113 – 500	4

A.1.2. Cálculos de los Conductores Eléctricos

A.1.2.1. Intensidad de Media Tensión

La intensidad en el primario de un transformador trifásico viene establecida por la ecuación (1):

$$I_{M.T} = \frac{S}{\sqrt{3} \times U_p} \quad (8)$$

Siendo:

S: Potencia del transformador en kVA.

U_p : Tensión compuesta primaria en kV = 13.2 kV.

$I_{M.T}$: Intensidad primaria en Amperios.

Dando valores queda:

$$I_{M.T} = \frac{150}{\sqrt{3} \times 13.2} = 6.6 \text{ A}$$

Esta sería la intensidad a plena carga que suministraría el transformador de distribución y el valor que determinará la capacidad de los cables que conforman la línea de alimentación conectada al sistema de distribución.

La intensidad vista desde el lado primario que reclamará la carga predeterminada por los puntos de carga de los dos EVSE es de:

$$I_{M.T} = \frac{105,26}{\sqrt{3} \times 13.2} = 4.6 \text{ A}$$

A.1.2.2. Intensidad de Baja Tensión

La intensidad en el secundario del transformador trifásico de 150 kVA que suministrará a plena carga se obtiene con la ecuación (2).

$$I_{M.B} = \frac{S}{\sqrt{3} \times U_s} \quad (9)$$

Siendo:

S: Potencia del transformador en kVA.

U_s : Tensión compuesta secundaria en kV = 0.48 kV.

$I_{M.B}$: Intensidad primaria en Amperios.

Dando valores queda:

$$I_{M.B} = \frac{150}{\sqrt{3} \times 0.48} = 180.4 \text{ A}$$

Esta sería la intensidad a plena carga que suministraría el transformador de distribución y el valor que determinará la capacidad de los cables que conforman la línea de alimentación conectada al sistema de distribución.

La intensidad vista desde el lado secundario que reclamará la carga predeterminada por los puntos de carga de los dos EVSE es de:

$$I_{M.B} = \frac{105.26}{\sqrt{3} \times 0.48} = 126.6 \text{ A}$$

A.1.2.3. Cálculo de la Corriente de Cortocircuito en Baja Tensión

Para calcular la corriente de corto circuito se procede obteniendo la impedancia total Z_T con la ecuación (3) y luego la corriente de corto circuito del secundario o por baja tensión se calcula con la ecuación (4). A continuación se muestran las ecuaciones (3) y (4).

$$Z_T = \frac{Z_{cc\%} U_s^2 \cdot 10}{S} \quad (10)$$

Siendo:

Z_T : Impedancia total Ω .

U_s : Tensión compuesta secundaria en kV = 0.48 kV.

S: Potencia Aparente para del transformador 150 kVA.

El valor de la impedancia total Z_T es la siguiente:

$$Z_T = \frac{4 \times 0.480^2 \times 10}{150} = 0.0614 \, \Omega$$

$$I_{cc} = \frac{U_s}{\sqrt{3} Z_T} \quad (11)$$

Siendo:

I_{cc} : Corriente de corto circuito kA.

Z_T : Impedancia total Ω .

U_s : Tensión compuesta secundaria en kV = 0.48 kV.

El valor de la corriente de corto circuito es la siguiente:

$$I_{cc} = \frac{480}{\sqrt{3} \times 0.0614} = 4510.55 \, A$$

A.1.2.4. Selección de Barras del Tablero de Distribución en Baja Tensión

Para la selección de las barras para el tablero general de distribución en baja tensión se utilizó la tabla de la norma DIN 43671 teniendo como referencia la corriente a plena carga del sistema en baja tensión la cual dio por resultado 360,84 A con la suma de las corrientes nominales del generador más la alimentación desde el transformador desde su secundario, se selecciona las barras en cobre 99% puro Pintadas una por fase, neutro y tierra, así:

Tabla A4. Memoria de resultados del Cálculo de las Barras del Tablero General de Distribución. Producción propia.

Ítem	Descripción	Dimensiones de sección transversal	Capacidad de Corriente C.A.	Sección mm2
		mm	(A)	mm2
1.0	BARRA DE FASES	25X5	385	125
2.0	BARRA DE NEUTRO	25X5	385	125
3.0	BARRA DE TIERRA	25X5	385	125

Tabla A5. Carga de platinas de cobre, según DIN 43671.

Ancho X espesor mm.	Sección mm ²	Peso Kgs/m	Carga continua en Amperios					
			Corriente Alterna					
			Pintadas			Desnudas		
			Nº de platinas			Nº de platinas		
			1	2	3	1	2	3
12X2	24	0,21	125	225	2060	110	200	18850
15X2	30	0,27	155	270	1750	140	240	1550
15X3	45	0,4	185	330	2450	170	300	2200
20X2	40	0,36	205	350	1980	185	315	1800
20X3	60	0,53	245	425	2800	220	380	2500
20X5	100	0,89	325	550	2450	290	4590	2200
25X3	75	0,67	300	510	3450	270	460	3100
25X5	125	1,11	385	670	2950	350	600	2600
30X3	90	0,8	350	600	4000	315	540	3600
30X5	150	1,34	450	780		400	700	
40X3	120	1,07	460	780		420	710	
40X5	200	1,78	600	1000		520	900	
40X10	400	3,56	835	1500		750	1350	
50X5	250	2,23	700	1200		630	1100	
50X10	500	4,45	1025	1800		920	1620	
60X5	300	2,67	825	1400		750	1300	
60X10	600	5,34	1200	2100		1100	1860	
80X5	400	3,56	1060	1800		950	1650	
80X10	800	7,12	1540	2600		1400	2300	
100X5	500	4,45	1310	2200		1200	2000	
100X10	1000	8,9	1880	3100		1700	2700	

A.1.2.5. Selección de Conductores Eléctricos en Baja Tensión

Para las acometidas en baja tensión se tiene en cuenta aquellas que conectan los equipos de carga EVSE y la conexión principal desde el transformador hasta el tablero de distribución general TGD en baja tensión. Es indispensable para la selección de los conductores los siguientes parámetros:

- 1- Intensidad máxima admisible por el cable.
- 2- Caída de tensión en el tramo del cable.

Para el cálculo de los conductores a utilizar en las canalizaciones en este proyecto se tuvieron en cuenta las siguientes premisas:

- Se tendrá en cuenta la carga instalada por circuito, la capacidad por sobre carga y una regulación por caída de tensión del máxima del 3% para cargas finales y 5% para acometidas tipo alimentador.

- Para el cálculo de la regulación de las cargas, se toma la distancia más larga que pueda presentarse dentro de la Estación de Recarga Rápida.
- El aislamiento mínimo será THHN/THWN-2 CT GR II para cables de baja tensión, temperatura de operación: 90°C, temperatura de corto circuito 250°C.
- Los cables de fuerza para baja tensión deberán ser monopolares para los calibres 2 AWG y superiores; y multiconductores (tripolares o tetrapolares) para los calibres 4 AWG e inferiores. El calibre mínimo para circuitos de fuerza deberá ser de 12 AWG.

- **Intensidad máxima admisible por el cable**

Se dimensiona el cable por capacidad de corriente nominal de la carga multiplicada por 1,25% para sobre cargas y se realiza la corrección de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$I' = \frac{I_n \times 125\%}{F_t \times F_{th} \times F_g} \quad (12)$$

(I') corriente que debe soportar el conductor seleccionado.

- (I_n) corriente nominal de la carga
- (F_t) Temperatura de acuerdo con la tabla 310-16 NTC-2050 [5]
- (F_{th}) Factor de resistividad térmica del suelo se usa la tabla 13-5 IEEE 399-1997. Para la Estación de Recarga Rápida se consideran ductos en concreto (55-85 °C-cm/W) F_{th}= 1.0, y ductos directamente enterrados (60 °C-cm/W). F_{th}= 1.0. [66]
- (F_g) Factor de agrupamiento de cables se usa la tabla 13-8 IEEE 399-1997 para los factores de agrupamiento en bancos de ductos.[66]

En la tabla siguiente se observan los resultados de la intensidad de corriente máxima admisible para los cables conductores de interés.

Tabla A6. Memoria de resultados del cálculo de intensidades de corriente. Producción Propia.

Ítem	TAG	Descripción	F. P	Tensión de Operación	Corriente a plena carga ajustada a 480V	Potencia Aparente	Potencia activa	Capacidad del Conductor	CÁLCULO DEL CONDUCTOR
				(VAC)	(A)	(KVA)	(KW)	(A)	Calibre (THHN 90°C) Tabla 310-16 NTC 2050
1.0	TR-TBTEVSE-001	Transformador-tablero 480VAC EVSE	0,85	480	180,42	150,00	127,50	180,42	2/0
2.0	TBTEVSE-PVGEN-001	Tablero 480VAC EVSE - GENERACIÓN CELDAS FOTOVOLTAICAS	0,85	480	180,42	150,00	127,50	180,42	2/0
3.0	TBTEVSE-001 - EVSE-001(002)	Tablero 480VAC EVSE - EVSE 1	0,95	480	63,31	52,63	50,00	79,13	2

- **Caída de tensión en el tramo del cable**

Debido a las características de resistencia y reactancia de los conductores, cuando estos conducen corriente se produce inevitablemente una diferencia entre la tensión en el origen del conductor y la tensión en el extremo o punto de utilización denominado caída de tensión. El valor de la caída de tensión está condicionado por características del conductor como:

- Material
- Sección del conductor
- Longitud del tramo de conductor.

Las características del circuito como:

- Corriente nominal/potencia de la carga.
- Monofásico/trifásico.

El cálculo de regulación de tensión y de selección el cable se realiza de manera que cumpla con la caída de tensión requerida para la corriente nominal de la carga por medio del siguiente procedimiento:

- 1- Primero se calcula la impedancia requerida por la acometida para cumplir con la caída de tensión deseada de acuerdo a las siguientes fórmulas:

Para circuitos trifásicos

$$Z_c = \frac{\frac{(\nabla v\%)(Vn)}{(100\%/\sqrt{3})}}{(In)(\frac{L}{1000})} \quad (13)$$

Para circuitos monofásicos

$$Z_c = \frac{\frac{(\nabla v\%)(Vn)}{(100\%/2)}}{(In)(\frac{L}{1000})} \quad (14)$$

Donde:

Z_c = Impedancia requerida del cable.

$\Delta V\%$ = Porcentaje de caída de tensión permitido.

V_n = Tensión eléctrica nominal

I_n = corriente nominal

L = longitud del conductor en Km.

- 2- Luego según catálogos de fabricante se selecciona la acometida que tenga una impedancia más cercana a la impedancia calculada, la impedancia del cable se calcula con la siguiente ecuación:

$$Z_c = R \cos \theta + j \sin \theta \quad (15)$$

Donde:

Z_c = impedancia del cable

θ = Factor de potencia

R = resistencia del cable

X = reactancia del cable

- 3- Para terminar, luego de seleccionar la acometida y tener la impedancia real del cable (Z_c), entonces se realiza la validación del porcentaje de caída de tensión que tendrá el cable, de acuerdo a las siguientes fórmulas:

Para circuitos trifásicos:

$$\Delta v = [(Z_c) \left(\frac{L}{1000} \right) (I_n)] (\sqrt{3}) \quad (16)$$

Para circuitos monofásicos:

$$\Delta v = [(Z_c) \left(\frac{L}{1000} \right) (I_n)] \quad (17)$$

Donde:

ΔV = Caída de tensión con impedancia real del cable.

Z_c = Impedancia real del cable seleccionado

L = longitud de la acometida en Km

I_n = corriente nominal

En la tabla siguiente se observan los resultados del cálculo de caída de tensión para los cables conductores de interés.

Tabla A7. Memoria de resultados del cálculo de Caída de tensión.

Ítem	TAG	Descripción	Tensión de Operación	Z eficaz por 1000m para $\rho=0.85$ de la tabla 9 del NEC	Long. de circuito	Constante de regulación del conductor	Caída de tensión	CALIBRE DEL CONDUCTOR
			(VAC)		m		%	AWG
1.0	TR-TBTEVSE-001	Transformador-tablero 480VAC EVSE	480	3,61000E-01	30,00	1,56684E-04	0,71	2/0
2.0	TBTEVSE-PVGEN-001	Tablero 480VAC EVSE - GENERACIÓN CELDAS FOTOVOLTAICAS	480	3,61000E-01	30,00	1,56684E-04	0,71	2/0
3.0	TBTEVSE-001 - EVSE-001(002)	Tablero 480VAC EVSE - EVSE 1	480	6,56000E-01	40,00	2,84722E-04	0,60	2

A.1.2.6.Cálculo de la Malla de Puesta a Tierra para el Tablero General de Distribución

Cálculo de la Malla de Puesta a Tierra

Basado en la norma IEEE 80-2000 "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding"

DATOS DEL TERRENO

Lado Mayor de la Malla	m	14,0
Lado Menor de la Malla	m	14,0
Resistividad de la 1ª Capa ρ_1 (si se modelan 2 capas de suelo)	$\Omega \cdot m$	
Resistividad de la 2ª Capa ρ_2 (si se modelan 2 capas de suelo)	$\Omega \cdot m$	
Espesor de la 1ª Capa H (si se modelan 2 capas de suelo)	m	
Resistividad equivalente del terreno ρ	$\Omega \cdot m$	50,00
Resistividad Capa Superficial ρ_s	$\Omega \cdot m$	2500
Espesor Capa Superficial h_s	m	0,15
Area de la Malla A	m ²	196
Profundidad de la Malla h	m	0,5

DATOS DE CONEXION

Tiempo de Despeje de la Falla t_f	seg	0,50
Temperatura Máxima de Operación	°C	450
Temperatura Ambiente	°C	25

DATOS DE CORRIENTE DE FALLA Y DE LA LINEA DE TRANSMISION DE AT DE ENTRADA

Corriente de Falla a Tierra I_f Lado AT	A	5000
Corriente de Falla a Tierra I_f Lado BT	A	5000
Relación X/R del Sistema	-	10
Factor de Decremento D_f	-	1,026
Corriente de Diseño de los Conductores (Lado de Mayor I_f)	A	5131
Cantidad de torres de transmisión de la línea de AT por km N_t	-	10,00
Resistencia de puesta a tierra de las torres de AT R_{tg}	Ω	10,0
Impedancia de los cables de guarda Z_f	Ω/km	2,36
Cantidad de cables de guarda en la línea de AT N_c	-	2
Impedancia equivalente de los cables de guarda y torres Z_{eq}	Ω	1,024
Factor Divisor de Corriente S_f (depende de R_g)	%	36,27%
Corriente de Diseño del Espaciamiento I_G (Lado AT)	A	1861

Por Favor Seleccione el Tipo Conexión en su Diseño

☒ UNION EXOTERMICA

☐ UNION COMPRESION

☐ VOLVER MENU PRINCIPAL

☐ IMPRIMIR DATOS

Nota: Si de las mediciones de resistividad del terreno se concluye que este se puede modelar por un suelo uniforme, entonces se debe usar el modelo de una capa de suelo y no debe introducir datos en ρ_1 , ρ_2 , ni H . Sólo necesita introducir el valor de la resistividad ρ . De lo contrario, modele el terreno por un suelo de dos capas introduciendo todos los valores, incluyendo el de resistividad equivalente ρ . ρ_1 y ρ_2 se obtienen de las mediciones. H y ρ se pueden obtener del método gráfico de Sunde, descrito en la IEEE 80-2000, cláusula 13.4.2.2. Allí, debe tomar a H como h , y a ρ como ρ_s .

- ❖ La malla debe extenderse por lo menos 1 m fuera de la cerca perimetral de la subestación.
- ❖ La profundidad de la malla h no debe ser menor de 0.5 m.

Los datos base para el desarrollo de los diseños de la malla de puesta a tierra son criterio del diseñador de acuerdo a lo requerido para obtener una robustez de la malla de puesta a tierra para el sistema que soporte los valores de corriente de falla ya sea por alta o por baja tensión. Con estos datos se obtiene una malla de puesta a tierra que resiste valores de tensiones de paso y de contacto que protegerán los operadores y usuarios de la Estación de recarga rápida para vehículos eléctricos de acuerdo con la norma IEEE 80 [68].

Cálculo de la Malla de Puesta a Tierra

Basado en la norma IEEE 80-2000 "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding"

CALCULO DEL CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA

Corriente de Diseño de los Conductores	A	5131
Sección Transversal Requerida del Conductor	mm ²	16,56
Temperatura Máxima de Operación	°C	450
Temperatura Ambiente	°C	25
Tiempo de Despeje de la Falla t_f	seg	0,50

Calibre del Conductor	Area		Nº Hilos	Diámetro de Cada Hilo	Diámetro Exterior	Peso Aproximado
	kcmil	mm ²				
1/0	105,6	53,49	7	3,12	9,35	485
2/0	133,1	67,43	7	3,5	10,5	611
3/0	167,8	85,01	7	3,93	11,8	771
4/0	211,6	107,22	7	4,42	13,3	972
250	250	127	12	3,67	15,2	1149
300	300	152	12	4,02	16,7	1378
350	350	177	12	4,34	18	1610
400	400	203	19	3,69	18,5	1838
450	450	228	19	3,91	19,6	2067
500	500	253	19	4,12	20,6	2297
550	550	279	37	3,1	21,7	2527
600	600	304	37	3,23	22,6	2757
650	650	329	37	3,37	23,6	2986
700	700	355	37	3,49	24,4	3216
750	750	380	37	3,62	25,3	3446

Fuente: CABEL

Resultado del Calibre del Conductor

	Diámetro	Calibre
Calibre Mínimo del Conductor:	10,50 mm	2/0

AWG, Cu

Nota:

CALCULO DE LA RETICULA DE MALLA DE PUESTA A TIERRA

Lado Mayor de la Malla	m	14,0
Lado Menor de la Malla	m	14,0
Espacio Entre Conductores Paralelos D	m	2,80
Nº de Conductores Paralelos al Lado Mayor	-	6
Nº de Conductores Paralelos al Lado Menor	-	6
Longitud Total del Conductor de la Malla L_c	m	168,0

Por Favor Seleccione el
Número de Conductores
en

TENSIONES TOLERABLES		<input type="radio"/> CRITERIO 50 kg <input checked="" type="radio"/> CRITERIO 70 kg		Por Favor Seleccione el Criterio de Diseño
Tensión de Toque Tolerable E_{touch}	V	866,35		
Tensión de Paso Tolerable E_{step}	V	2.799,31		
Factor de Reflexión K	-	-0,96		
Factor de Reducción del Terreno C_s	-	0,77		

Nota: Se recomienda dimensionar según el criterio de 70 kg.

<input type="radio"/> Sin Jabalinas <input type="radio"/> Sólo Jabalinas Dentro de la Malla <input checked="" type="radio"/> Con Jabalinas en el Perímetro y con o sin Jabalinas Dentro de la Malla	Por Favor Seleccione el Tipo de Arreglo
---	---

Nota: Si se colocan sólo jabalinas en las esquinas y con o sin jabalinas dentro de la malla, seleccione el tercer tipo de arreglo: jabalinas en el perímetro.

CALCULO DE LA TENSION DE TOQUE		Tensión de Toque E_m V 443,08 Resistividad del Suelo ρ $\Omega.m$ 50,00 Factor de Espaciamento Para Tensión de Toque K_m - 0,600 Factor Correctivo por Geometría de la Malla K_i - 1,532 Máxima Corriente de la Malla I_G A 1.861 Longitud Total del Conductor de la Malla L_c m 168,0		Ud. seleccionó un arreglo con jabalinas: Por favor coloque todos los datos de las jabalinas →
Factor de Espaciamento Para Tensión de Toque Factor de Espaciamento Para Tensión de Toque K_m - 0,600 Espacio Entre Conductores Paralelos D m 2,80 Profundidad de la Malla h m 0,5 N° Efectivo de Conductores Paralelos de la Cuadrícula n - 6,00 Diámetro del Conductor de la Malla d m 0,01050 Factor Correctivo del Efecto de las Jabalinas K_H - 1,000 Factor Correctivo por Profundidad de los Conductores K_h - 1,225 Factor Correctivo por Geometría de la Malla Factor Correctivo por Geometría de la Malla K_i - 1,532		JABALINAS Número de Jabalinas n_R - 6 Diámetro de las Jabalinas $2.b$ pulg 0,625 Longitud de las Jabalinas L_r m 2,44		
CALCULO DE LA TENSION DE PASO		Tensión de Paso E_s V 536,84 Resistividad del Suelo ρ $\Omega.m$ 50 Factor de Espaciamento Para Tensión de Paso K_s - 0,521 Factor Correctivo por Geometría de la Malla K_i - 1,532 Máxima Corriente de la Malla I_G A 1.861 Longitud Total del Conductor de la Malla L_s m 138,4		RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA Resistencia de Puesta a Tierra R_g Ω 1,799 Resistividad Aparente ρ_a $\Omega.m$ 50,00 Resistencia de la Malla R_1 Ω 1,822 Resistencia de las Jabalinas R_2 Ω 3,869 Resistencia Mutua R_m Ω 1,584 Coeficiente k_1 - 1,37 Coeficiente k_2 - 5,65
Factor de Espaciamento Para Tensión de Paso Factor de Espaciamento Para Tensión de Paso K_s - 0,521 Espacio Entre Conductores Paralelos D m 2,80 Profundidad de la Malla h m 0,50 N° Efectivo de Conductores Paralelos de la Cuadrícula n - 6,00		POTENCIAL MÁXIMO DE LA MALLA Potencial Máximo de la Malla GPR V 3348,82		

El Diseño Es Apropiado:

Tensión de Toque 51,14% de la Tensión de Toque Tolerable
 Tensión de Paso 19,18% de la Tensión de Paso Tolerable

☐ VOLVER MENU PRINCIPAL
☐ IMPRIMIR RESULTADOS

Nota: Las jabalinas convencionales son de 2.44 m de largo y 5/8 pulgadas (0.625 pulg).
 Se obtienen jabalinas más largas atomillándolas entre sí, por lo que la longitud de las jabalinas L_r a introducir debería ser un múltiplo de 2.44 m.

La malla de puesta a tierra que describen los cálculos anteriores se refiere a un cuadrado de 14m de longitud en sus lados, enterrada a un mínimo de 0.5 m de profundidad, que se construye con un cable de cobre desnudo de mínimo 2/0 AWG y se instalarán seis (6) jabalinas de 2.44m conectadas como se indica en la figura A1. Se considera una capa de 15 cm de material de alta resistencia como grava para el área de la malla que tendría un total de 196 m². El diseño propuesto para la Estación de Recarga Rápida para vehículos Eléctricos cumple con requerido de acuerdo con la norma IEEE 80 [68].

en cuenta las condiciones de red de la Ciudad de Bogotá de acuerdo con las características del sistema eléctrico observadas en el ítem 2.2.1 de este documento.

A.1.3.1. Condiciones del Equivalente de Red

Las condiciones del equivalente de red requiere el intervalo donde se moverá la potencia aparente total del sistema eléctrico al cual se conectará la Estación de recarga a partir del cual se establece la corriente corto circuito de acuerdo con la norma IEC. En la tabla A9 se observa la ventana del software NEPLAN que arroja los parámetros considerados para el equivalente de la red a la cual se conecta la Estación de Recarga Rápida.

Tabla A9. Datos base para el Equivalente de red, vista del software NEPLAN.

Parámetros

Nombre:

Tipo:

Cantidades CC Trifásico

Sk"máx .. MVA: Sk"mín .. MVA: ☒ Ik" de acuerdo con IEC

Ik"máx .. kA: Ik"mín .. kA: Eoper .. pu:

R(1)/X(1) máx: R(1)/X(1) mín:

Cantidades CC Monofásico

Ik"máx .. kA: Ik"mín .. kA:

Z(0)/Z(1) máx: Z(0)/Z(1) mín:

R(0)/X(0) máx: R(0)/X(0) mín:

Datos de Operación

Tipo - FC: Porción Slack .. %:

P oper .. MW: V oper .. %:

Q oper .. Mvar: Ang oper .. °:

Nodo Control. Remotam.:

Modo de Operación

Costos de Generación MW:

c0 ..

c1 ..

c2 .. Moneda/h:

Factor Mult.:


Análisis de Armónicos

C .. uF:

A.1.3.2. Condiciones del Nodo Frontera con la S/E del EVSE

El Nodo de frontera con la Subestación eléctrica de que distribuye la energía a la Estación de Recarga Rápida tiene una tensión de 13200 voltios acorde con los niveles de tensión normalizados por la empresa de distribución de energía local CODENSA [22]. En la tabla A10 se observa la vista dada por el Software NEPLAN para el nodo en mención.

Tabla A10. Datos base para las condiciones de Nodo de Frontera, vista del software NEPLAN.

 **Parámetros**

Nombre:

FRONTERA DE LA S/E DEL EVSE

Tipo:

...

Área:

Area 1

...

Zona:

Zone 1

...

Tipo de nodo:

Nodo

...

Vn .. kV:

13,2

f .. Hz:

60

Vobj. ... %:

0

ip máx. ... kA:

0

Vmín. ... %:

0

t dp ... s:

0

Vmáx. ... %:

0

☐ Nodo de prot. de distancia

En tipo de subestación:

Otro

...

Arco Eléctrico

Tipo de equipo:

Aire libre

...

Espacio entre conductores..mm:

0

Directriz ISSA

kB:

0,5

☒ Usar entrada k

kT:

1

A este nodo se conecta el equivalente de red aguas arriba y el transformador de distribución de 150 kVA seleccionado aguas abajo.

A.1.3.3. Condiciones en el Transformador de Distribución en la S/E del EVSE

El transformador de distribución de 150 kVA 13,2/0,48 kV seleccionado con los cálculos realizados en el ítem 2.2.3 de acuerdo a las potencias normalizadas por la empresa de distribución de energía local CODENSA [21], se presenta en la simulación con las características observadas en la tabla 17.

Tabla A11. Datos base para las condiciones en el Transformador de Distribución de 150 kVA, vista del software NEPLAN.

Parámetros			
Nombre:	Transformador Estación de Recarga Rápida		
Tipo:	150 kVA		
	<input checked="" type="radio"/> Transformador Trifásico <input type="radio"/> Transformador 3x 1-Fase		
Vn1 .. kV:	13,2	Vn2 .. kV:	0,48
Vr1 .. kV:	13,2	Vr2 .. kV:	0,48
		Sr .. MVA:	0,15
Rr(1) .. %:	1,08	kW:	1,6
Zcc(1) .. %:	4	R(0) .. %:	1,08
X(1)/R(1):	3,57	kW:	1,6
		Zcc(0) .. %:	3,8
Io .. %:	1,7	X(0)/R(0):	3,37
P fe .. kW:	0		
		V01(0) .. %:	0
		V02(0) .. %:	0
		LMnoSAT .. pu:	58,8235
		LMSAT .. pu:	0
		KP .. pu:	0
<input type="checkbox"/> Tiene capacidad de cambiador de taps bajo carga (IE)		? resi. A..pu:	0
<input type="checkbox"/> Camb. Tap bajo carga		? resi. B..pu:	0
<input type="checkbox"/> Suicheable		? resi. C..pu:	0
<input type="checkbox"/> Autotransformador			
Grupo vectorial:	Dyn5		

A.1.3.4. Condiciones en el Nodo de Baja tensión de Tablero de Distribución General

El Nodo de baja tensión se encuentra en el tablero de distribución general cuyas barras se seleccionaron en el ítem 2.2.6. El tablero tiene barras aisladas a 600 voltios, con una tensión de operación de 480 V a la cual se distribuye la energía a los puntos de recarga. En la tabla 18 se observa la vista dada por el Software NEPLAN para el nodo en mención.

Tabla A12. Datos base para las condiciones en el nodo de baja tensión, vista del software NEPLAN.

Parámetros

Nombre: BARRAJE DE BT

Tipo: 480 V

Área: Area 1

Zona: Zone 1

Tipo de nodo: Nodo

Vn .. kV: 0,48 f .. Hz: 60

Vobj. ... %: 0 ip máx. ... kA: 0

Vmin ... %: 0 t dp ... s: 0

Vmáx ... %: 0

☐ Nodo de prot. de distancia

En tipo de subestación: Otro

ArcoEléctrico

Tipo de equipo: Aire libre

Espacio entre conductores..mm: 32

Directriz ISSA

kB: 0,5 ☒ Usar entrada k

kT: 1

A este nodo se conectan aguas arriba el transformador de distribución en el lado de baja tensión y aguas abajo se conectan los dos puntos de recarga rápida y el sistema de generación renovable de celdas fotovoltaicas.

A.1.3.5. Condiciones en los puntos de recarga rápida para EV

Los dos puntos de recarga rápida para vehículos eléctricos conectados como cargas en el sistema de la estación de recarga soportada en la simulación en el software NEPLAN presenta las características del ítem 2.2.2. En la tabla 19 se presenta los datos para el surtidor 1 EVSE, cuyos datos son idénticos al surtidor 2 EVSE que también se incluye en la simulación.

Tabla A13. Datos base para las condiciones en los puntos de recarga rápida para vehículos eléctricos, vista del software NEPLAN.

Análisis de FC

Nombre:

Tipo:

Tipo - FC:

Unidades:

S .. MVA: E .. MWh:

P .. MW: Fact. Velander 1:

Q .. Mvar: Fact. Velander 2:

I .. kA:

cos(phi):

Valores escalados:

S oper .. MVA: Fact. de escal. efect. para P:

P oper .. MW: Fact. de escal. efect. para Q:

Q oper .. Mvar:

I oper .. kA:

cos(phi) oper:

A.1.3.6. Condiciones del Generador PV

La generación asociada con energía renovable se establece con Celdas Fotovoltaicas las cuales se pueden simular con el módulo dispuesto en el software NEPLAN para generación distribuida. A través de este módulo se tiene varias opciones para la simulación con generación de energía renovable como por ejemplo: Generación Eólica, Generación Fotovoltaica, Celda de combustible y Generación Renovable.

Actualmente se han realizado la evaluación de las tecnologías para módulos fotovoltaicos en la Ciudad de Bogotá de cuatro tecnologías: módulos de silicio monocristalinos, módulos de silicio policristalinos, módulos de silicio amorfo de capa fina y módulos de silicio monocristalino de alta eficiencia. Se sigue la recomendación dada por el estudio reciente del Grupo GICS del SENA que encuentra los módulos de mejor desempeño los de silicio amorfo y de silicio monocristalino de alta eficiencia por tener coeficientes de rendimiento alrededor de 73% [67].

Tabla A14. Datos base para las condiciones en la Generación Fotovoltaica, vista del software NEPLAN.

Parámetros

Nombre...: PV GENERACIÓN

Tipo: []

Tipo de Generac.: Energía Renovable

Número de Unidades: 1

Vr .. kV: 0,48 Cosphi r: 1

Sr .. MVA: 150

Datos cortocircuito

☒ Estación normal de potencia
 ☐ ASM Dobl. Alimentación
 ☐ Subestación de conversor de pot

Sk" máx ..: 150	Z(0)/Z(1): 0	<input checked="" type="checkbox"/> Ik" de acuerdo con IEC
Sk" mín ..: 105	R(0)/X(0): 0,1	Eoper .. pu: 1
R(1)/X(1) max: 0,1	Z(2)/Z(1): 0	<input type="checkbox"/> Variador de velocidad (drive)
R(1)/X(1) min: 0,1	R(2)/X(2): 0,1	<input checked="" type="checkbox"/> Aislado
		<input type="checkbox"/> Reversible

ASM Dobl. Alimentación	Subestación de conversor de potencia	
iWDmáx..kA: 0	IscPF3p..kA: 0	IscPF2p..kA: 0
IkWDMáx..kA: 0	IscPF1p..kA: 0	IscPF2pE..kA: 0
Kappa WD: 1,7	IkPFmax..kA: 0	

Bibliografía

- [1] OECD Better Policies for Better lives / IEA International Energy Agency, "Global EV Outlook 2015", 9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, Francia, Tech. Rep. 19, 2015.
- [2] OECD Better Policies for Better lives / IEA International Energy Agency, "Global EV Outlook- Understanding the electric vehicle landscape to 2020", 9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, Francia, Tech. Rep. 19, 2013.
- [3] OECD Better Policies for Better lives / IEA International Energy Agency, "Key World Statistics 2014," 9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, Francia, Tech. Rep. 19, Nov. 2014.
- [4] Ministerio de Minas y Energía, "Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE", Colombia 2013.
- [5] ICONTEC. "Código Eléctrico Colombiano- NTC 2050". Colombia, 1998.
- [6] UPME - Unidad de Planeación Minero Energética, "Proyección de Demanda de Combustibles Líquidos y GNV en Colombia," Bogotá D.C., Colombia, 2012.
- [7] Edder Alexander Velandia Duran, CODENSA SA ESP. "Energía eléctrica. Alternativa energética para un transporte urbano sustentable en Colombia.", Colombia, 2009.
- [8] Unidad De Planeación Minero Energética – UPME, Ministerio de Minas y Energía. "Informe de gestión 2014", Colombia, 2014.
- [9] Unidad De Planeación Minero Energética – UPME, Ministerio de Minas y Energía. "Informe de gestión 2013", Colombia, 2013.
- [10] Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia. "Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Demás Formas de Energía No Convencionales – PROURE Plan de acción indicativo 2015", Colombia, 2010.
- [11] Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, Ministerio de Minas y Energía. "Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico Colombiano Marzo de 2014", Colombia, 2014.
- [12] Diario Portafolio. "Inauguran estación de recarga para carros eléctricos", Colombia, Marzo 10 de 2015. Disponible en: [www. Portafolio.com](http://www.Portafolio.com).
- [13] National Fire Protection Association - NFPA. "Código Eléctrico Nacional – NFPA 70". Estado Unidos de América, 2014.
- [14] National Electrical Manufacturers - NEMA. "EVSE Powering the Electric Vehicle". Disponible en: www.nema.org/Products/Documents/nema+evse+presentation+for+communities.pdf
- [15] National Fire Protection Association - NFPA. NFPA 505: Fire Safety Standard For Powered Industrial Trucks Including Type Designations, Areas Of Use, Conversions, Maintenance, And Operations. Estado Unidos de América, 2013.

- [16] Blas Morales Quintana. "Modelo de masificación de vehículos eléctricos en Bogotá D.C.". Tesis de grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica. Grupo de Investigación "Electrical Machines & Drives", EM&D, del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2015.
- [17] Underwriters Laboratories. "Standard for Electric Vehicle (EV) Charging System Equipment - UL 2202". Estados Unidos de América, 2012.
- [18] ENDESA. "Smartcity Málaga, Un modelo de gestión energética sostenible para las ciudades del futuro". España, 2011.
- [19] U.S. Department of Energy. "Alternative Fuels Data Center". Disponible en: [http:// www.afdc.energy.gov/conservation/idle_reduction_electrification.html](http://www.afdc.energy.gov/conservation/idle_reduction_electrification.html)
- [20] International Electrotechnical Commission - IEC. "IEC 61851-1: Sistema conductivo de carga para vehículos eléctricos. Parte 1: Requisitos Generales." Suiza, 2010.
- [21] Society of Automotive Engineers – SAE. "SAE Surface Vehicle Recommended Practice J1772, SAE Electric Vehicle Conductive Charge Coupler", Estados Unidos de América, 2010.
- [22] CODENSA SA ESP – "Especificación Técnica: Transformador de distribución trifásico ocasionalmente sumergible, potencia ≤ 500 kVA". Bogotá, 2013. Disponible en: http://likinormas.micodensa.com/Especificacion/transformadores/et009_transformador_distribucion_trifasico_ocasionalmente_sumergible_potencia_500_kva.
- [23] <http://www.chademo.com>
- [24] M.J Covington, R. Carskadden, "Threat implications of the Internet of Things". Cyber Conflict (CyCon), 5th International Conference on. Tallinn, Estonia, 2013.
- [25] AeroVironment. "Public Fast Charging Station, 50kW DC". Monrovia, CA, Estados Unidos, 2011.
- [26] den Bossche Peter, Verbrugge Bavo, Omar Noshin, Van Mierlo Joeri, "Matching Accessories: Standardization Developments in Electric Vehicle Infrastructure". EVS25 World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium – IEEE. Shenzhen, China, 2010.
- [27] Circuitor. "Equipo de recarga rápida exterior Combo & CHADEMO - RVE-QPC. Barcelona, España, 2015.
- [28] Centre National du Transport Avancé (CNTA), Régie du bâtiment du Québec (RBQ), Corporation des maîtres électriciens du Québec (CMEQ), Hydro-Québec. "Electric Vehicle Charging Stations - Technical Installation Guide". 1st edition. Hydro-Québec. Canada, 2012.
- [29] USAENE, LLC-TECNALIA, BANCOLDX. "Informa Final: Diseño del Marco Regulatorio para el Desarrollo de los Vehículos Eléctricos en Colombia". Bogotá, Colombia, 2013.
- [30] G. Ritrovati, G. De Maso-Gentile, C. Scavongelli, M. Conti, "Active role of a NFC enabled smartphone in EV-EVSE charging process". Electric Vehicle Conference (IEVC), IEEE International. Florence, Italy, 2014.
- [31] P. Fairley, "Car Sharing Could Be the EV's Killer App". IEEE Spectrum, USA, 2013.
- [32] Internet.org. "State of Connectivity: A Report on Global Internet Access". Estados Unidos, 2014.

- [33] International Telecommunication Union. "Measuring the Information Society Report 2014". Geneva, Switzerland, 2014.
- [34] Banco Mundial. "Datos para América Latina y el Caribe (países en desarrollo solamente) año 2014". Estados Unidos, 2014. Disponible en: "<http://datos.bancomundial.org/region/LAC>".
- [35] GE Industrial Solutions. "NEMA EVSE CHARGING STATION USER MANUAL & INSTALLATION INSTRUCTIONS". Plainfield, Connecticut, EE.UU. 2011. Disponible en: <https://www.geindustrial.com>.
- [36] Samuel Ramírez Castaño, Eduardo Antonio Cano Plata. "Calidad del Servicio de Energía Eléctrica". Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Segunda Ed. Manizales, Colombia. 2008.
- [37] Samuel Ramírez Castaño, Eduardo Antonio Cano Plata. "Redes de Distribución de Energía". Universidad Nacional de Colombia. Tercera Ed. Manizales, Colombia. 2008.
- [38] Carolina Obando Anzola, Omar Alfredo Báez Daza, Carlos Arturo García Botero, Unidad de Planeación Minero Energética – UPME. "Colombia, transición hacia vehículos cero emisiones". Revista Mundo Eléctrico No 102, páginas 34-48 . Bogotá, Colombia. 2015.
- [39] Edder Alexander Velandia Duran. "Estado actual del transporte eléctrico en Colombia". Revista Mundo Eléctrico No 102, páginas 50-58. Bogotá, Colombia. 2015.
- [40] CODENSA SA ESP. "Automatización de servicios energéticos para la recarga de vehículos eléctricos". Revista Mundo Eléctrico No 102, páginas 70-72. Bogotá, Colombia. 2015.
- [41] Office of Transportation and Air Quality, Environmental Protection Agency. "Entendiendo las Nuevas Etiquetas de Eficiencia de Combustible y el Medio Ambiente". Estado Unidos de América. 2012.
- [42] Joachim Skov Johansen. "Fast-Charging Electric Vehicles using AC". Master's Thesis, The Master of Science in Engineering (M.Sc.Eng.) at the Technical University of Denmark. Lyngby, Denmark. September 2013.
- [43] Franz H. PEREYRA ZAMORA, Henrique KAGAN, Marcelo A. PELEGRINI, Vitor Luiz G. GARDIMAN. "Evaluation of the impact of electric vehicles on distribution systems combining deterministic and probabilistic approaches". E-ISBN: 978-1-84919-732-8. Electricity Distribution (CIRED 2013), 22nd International Conference and Exhibition on – IET. Stockholm, Sweden. 2013.
- [44] Zhu Guiping, Xing Yuhui. "Electric Vehicle Charging Strategy in Metropolises in China". ISSN : 1944-9925. Power and Energy Society General Meeting (PES), IEEE. Vancouver, BC. 2013.
- [45] Noha Sadek. "PROSPECTS OF ELECTRIC VEHICLES IN MIDDLE-EAST NORTH AFRICA MARKETS". Print ISBN: 978-1-61284-118-2. GCC Conference and Exhibition (GCC) - IEEE. Dubai, UAE. 2011.
- [46] Remco A. Verzijlbergh, Marija D. Ilić, Zofia Lukszo. "The role of electric vehicles on a green island". Print ISBN:978-1-4577-0417-8. North American Power Symposium (NAPS) - IEEE. Boston, MA. 2011.

- [47] Claas, B.; Marker, S.; Bickert, S.; Linssen, J.; Strunz, K. "Integration of plug-in hybrid and electric vehicles: Experience from Germany". Print ISBN:978-1-4244-6549-1. Power and Energy Society General Meeting - IEEE. Minneapolis, MN. 2010.
- [48] Yonghua Song; Xia Yang; Zongxiang Lu. "Integration of plug-in hybrid and electric vehicles: Experience from China". Print ISBN:978-1-4244-6549-1. Power and Energy Society General Meeting, IEEE. Minneapolis, MN. 2010.
- [49] Hongtao Chen; Jun Jin; Jin Chen. "Catching up in new energy vehicle industry: Review of its development and policies in China". Pages: 810 - 814, DOI: 10.1109/ICMIT.2008.4654470. Management of Innovation and Technology, 2008. ICMIT 2008. 4th IEEE International Conference on. Bangkok, Thailand. 2008.
- [50] Riveros, M.; Paredes, G.; Vargas, L. "Impact of electric vehicles on the reconfiguration requirements of a distribution network: The Santiago city case". Pages: 1 - 10, DOI: 10.1109/TDC-LA.2012.6319115. Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), 2012 Sixth IEEE/PES. Montevideo, Uruguay. 2012.
- [51] Freire, F.; Marques, P. "Electric vehicles in Portugal: An integrated energy, greenhouse gas and cost life-cycle analysis". Pages: 1 - 6, DOI: 10.1109/ISSST.2012.6227988. Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2012 IEEE International Symposium on. Boston, MA. 2012.
- [52] Ruayariyasub, S.; Thammasiroj, W. "The impact of unexpected power demand from electric vehicles on future load profiles: Case study on Thailand". Pages: 1 - 7, DOI: 10.1109/ISGT.2011.5759153. Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011 IEEE PES. Hilton Anaheim, CA. 2011.
- [53] Lojowska, A.; Ciupuliga, A.R.; Papaefthymiou, G.; van der Sluis, L. "The impacts of extra load from EVs in the Netherlands: A North-West Europe case study". Pages: 1 - 7, DOI: 10.1109/IEVC.2012.6183219. Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International. Greenville, SC. 2012.
- [54] Palma-Behnke, R.; Estévez, P. "Integration of PHEVs and EVs: Experience from Chile". Pages: 1 - 3, DOI: 10.1109/PES.2010.5590174. Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE. Minneapolis, MN. 2010.
- [55] Pillai, J.R.; Shaojun Huang; Thogersen, P.; Moller, J.; Bak-Jensen, B. "Electric vehicles in low voltage residential grid: A danish case study". Pages: 1 - 7, DOI: 10.1109/ISGTEurope.2012.6465804. Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on. Berlin, Germany. 2012.
- [56] L. M. Hinestroza Olascuaga, O. F. Prias Caicedo, J. A. Rosero Garcia. "Key Challenges within the Definition of a Regulatory Framework for Electric Vehicles: Experience from Colombia". Pages: 1 - 7, DOI: 10.1109/IEVC.2013.6681146. Electric Vehicle Conference (IEVC), 2013 IEEE International. Santa Clara, CA. 2013.

- [57] Basu, M.; Gaughan, Kevin; Coyle, E. "Harmonic distortion caused by EV battery chargers in the distribution systems network and its remedy". Pages: 869 - 873 vol. 1. Universities Power Engineering Conference, 2004. UPEC 2004. 39th International. Bristol, UK. 2004.
- [58] <http://www.neplan.ch>
- [59] Zuniga, I.E.; Botina, Y.F. "Technical economic study for the implementation of autonomous photovoltaic systems in the residential sector of Colombia". Pages: 1 - 5, DOI: 10.1109/TDC-LA.2012.6319141. Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), 2012 Sixth IEEE/PES. Montevideo, Uruguay. 2012.
- [60] International Electrotechnical Commission. "IEC 60909-0: Short-circuit currents in three-phase a.c. systems". Suiza, 2015.
- [61] N. Machiels, N. Leemput, F. Geth, J. Van Roy, J. Büscher, J. Driesen. "Design Criteria for Fast Charging Stations for Electric Vehicles Based on Flemish Mobility". Pages: 320 - 327, DOI: 10.1109/TSG.2013.2278723. International Conference on Smart Grid, IEEE Transactions on. Belgica, 2014.. Bali, Indonesia. 2014.
- [62] Zuzhi Zhang; Haiping Xu; Lei Shi; Dongxu Li; Yuchen Han, "A Unit Power Factor DC Fast Charger for Electric Vehicle Charging Station". Pages: 411 - 415, DOI: 10.1109/IPEMC.2012.6258896. Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 2012 7th International. Harbin, China, 2012.
- [63] Diario El Espectador. "Codensa y Terpel quieren más "electrolineras" en Colombia". Bogotá, Colombia, Febrero 22 de 2016. Disponible en: www.elespectador.com.
- [64] Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE. "Std. 141 - Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants", IEEE Red Book. Estados Unidos de América, 1999.
- [65] Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE. "Std. 446 - Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications", IEEE Orange Book. Estados Unidos de América, 2000.
- [66] Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE. "Std. 399 Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis", IEEE brown Book. Estados Unidos de América, 1997.
- [67] Daniel Adrian Pérez-Moscote, Grupo de Investigación GICS del Centro de Electricidad, Electrónica y Telecomunicaciones Servicio Nacional de aprendizaje SENA. "Análisis Comparativo de Cuatro Tecnologías de Módulos Solares Fotovoltaicos Instalados en Bogotá, Colombia". Revista Mundo Eléctrico No 99, páginas 78-85 . Bogotá, Colombia. 2015.
- [68] Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE. "Std. 80 Guide for Safety in AC Substation Grounding". Estados Unidos de América, 2015.
- [69] Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE. "Std. 519-2014 - IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems". Estados Unidos de América, 2014.

- [70] A. Purwadi, A. Rizqiawan, A. Donny, N. Heryana. "Analysis of bidirectional DC fast charging according to distribution transformer loading conditions". Pages: 80 - 84, DOI: 10.1109/ICPERE.2014.7067231. Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), 2014 International Conference on. Bali, Indonesia. 2014.
- [71] V. L. Nguyen, T. Tran-Quoc, S. Bacha. "Harmonic distortion mitigation for electric vehicle fast charging systems". Pages: 1 - 6, DOI: 10.1109/PTC.2013.6652435. PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble. Grenoble, Francia. 2013.
- [72] I. E. Zuñiga, Y. F. Botina. "Technical economic study for the implementation of autonomous photovoltaic systems in the residential sector of Colombia". Pages: 1 - 5, DOI: 10.1109/TDC-LA.2012.6319141. Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA), 2012 Sixth IEEE/PES. Montevideo, Uruguay. 2012.
- [73] L. Kütt, E. Saarijärvi, M. Lehtonen, H. Mölder, J. Niitsoo. "Estimating the harmonic distortions in a distribution network supplying EV charging load using practical source data – case example". Pages: 1 - 5, DOI: 10.1109/PESGM.2014.6939267. IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition. National Harbor, Estados Unidos. 2014.
- [74] Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia. "Smart Grids Colombia: Visión 2030", Colombia, 2016.
- [75] International Electrotechnical Commission - IEC. "IEC 61850 (Todas sus partes): Redes y sistemas de comunicación para la automatización de servicios eléctricos." Suiza, 2018.
- [76] Wilmar Hernán Martínez Martínez. "Diseño de un sistema de carga y descarga de energía eléctrica para vehículos eléctricos de alto desempeño." Tesis de grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica. Grupo de Investigación "Compatibilidad Electromagnética", EM&D, del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2013.
- [77] EPM SA ESP – "RA8-031 -Instalación De Estaciones De Carga Para Vehículos Eléctricos". Medellín, 2018. Disponible en: <https://www.epm.com.co/site/Portals/3/documentos/Energia/RA8-031/Norma%20RA8-031%20Instalaci%C3%B3n%20de%20estaciones%20de%20carga%20veh%C3%ADculos%20el%C3%A9ctricos.pdf?ver=2018-07-30-114633-887>.
- [78] Javier Logroño Diéguez. "Cargador de batería para vehículos." Trabajo de fin de grado de Ingeniería Eléctrica. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2017.
- [79] <https://fastned.nl>.
- [80] Shinichi Sano ; Yoshiaki Ito ; Yoshikazu Hirose ; Hisaki Takeuchi ; Shigeo aone, "Desarrollo de una batería de plomo-ácido regulada por válvula de larga vida útil para un sistema de almacenamiento de energía de batería a gran escala para utilizar energía renovable". International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), IEEE International. Osaka, Japón, 2015.

- [81] M. Tesfaye ; Cc castello, "Minimización del impacto de los equipos de suministro de vehículos eléctricos a la red eléctrica mediante un banco de baterías controlado dinámicamente para el afeitado de carga máxima". PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), IEEE International. Washington, DC, EE. UU., 2013.
- [82] Kamyar Khosravi; Shahabeddin Vamegh E.; Rached Dhaouadi, "Gestión de energía y control de un sistema fotovoltaico autónomo utilizando ultracapacitores". IV Conferencia internacional sobre sistemas de conversión de energía eléctrica y energía (EPECS), IEEE International. Sharjah, Emiratos Árabes Unidos, 2016.
- [83] Takaoka Toko CO. Quick Charger (50 kW & 20 kW) Disponible en: <https://www.tktk.co.jp/en/product/ev/quickcharger/>
- [84] Setec Power. EV Fast Charger SET450-200Y-SC (100 kW) Disponible en: <http://www.setec-power.com/china/100kw-ccs-chademo-ev-charger>
- [85] Electric Power Research Institute (EPRI). "Report to NIST on the Smart Grid Interoperability Standards Roadmap." EE.UU., 2009.
- [86] International Electrotechnical Commission - IEC. "Smart grid standards map." Suiza, 2018.
- [87] European Committee for Electrotechnical Standardization – CENELEC. "CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group, First Set of Standards." November, pp. 1–216, 2012.
- [88] Instituto Nacional de ciberseguridad de España S.A. "Estándar IEC 61850, todos para uno y uno para todos". España, 2019. Disponible en: <https://www.incibe-cert.es/blog/estandar-iec-61850-todos-uno-y-uno-todos>.
- [89] Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE. "Std. 1159 "Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality". EE.UU., New York 2009.
- [90] International Electrotechnical Commission - IEC. "Std 61000 Electromagnetic compatibility"" Suiza, 2018.